

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Katedra elektroenergetiky**

**Eliminace hlukových emisí elektrických zařízení**

**Elimination of Noise Emission of Electrical Equipment**

**Disertační práce ve studijním oboru DRS**

**Elektroenergetika**

**Srpen 2013**

**Ing. Viktor Pokorný**



**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Katedra elektroenergetiky**

**Doktorský studijní program:** Elektrotechnika, sdělovací a výpočetní technika (P2645)

**Studijní obor:** Elektroenergetika (3907V001)

**Autor:** Ing. Viktor Pokorný

**Školitel:** doc. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D.

### **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 1.8.2013

.....

Podpis



*Ing. Viktor Pokorný,*

Disertační práce: Eliminace hlukových emisí elektrických zařízení

---



*Ing. Viktor Pokorný,*

Disertační práce: Eliminace hlukových emisí elektrických zařízení

---

## **Poděkování**

Za odborné vedení při řešení výzkumných grantů, za cenné rady a podnětné připomínky k mé disertační práci bych chtěl poděkovat svému školiteli doc. Ing. Stanislavu Mišákovi, Ph.D.

Také děkuji svým kolegům za spolupráci při jednotlivých měřeních a v neposlední řadě bych chtěl také poděkovat svým rodičům za trpělivost a podporu při studiu.





*Ing. Viktor Pokorný,*

Disertační práce: Eliminace hlukových emisí elektrických zařízení

---

„Život je otázkou priorit“

***V. P.***



## **Anotace**

Cílem této disertační práce je vytvoření funkčního systému, který bude eliminovat hluk elektrických zařízení. Tento systém pracuje na aktivní bázi, bude tedy zpracovávat samotný parazitní signál a využívat jej k eliminaci hluku zařízení. V první fázi jde hlavně o eliminaci (zvýšeného akustického tlaku) energetických zařízení s velkou intenzitou, ale s malými frekvenčními výchylkami.

## **Klíčová slova**

Protifáze, transformátor, hluk, akustický signál.



## **Annotation**

The aim of this research is to create functional system which eliminates the noise of electrical devices. This system works on active basis, therefore it process parasitic signal itself and use it for elimination of the noise. On the first stage it focuses on elimination of energetic devices with great intensity of noise but with small frequency deviations.

## **Key words**

Anti-phase, transformer, noise, acoustic signal.

## Seznam použitých symbolů a značek

### 1) Jednotky

Veličina - Značka	Jednotka	Označení veličiny - popis
$L_{pa}$	(dB)	hodnota hladiny akustického tlaku
$N$	(-)	třída hluku
$y$	(-)	okamžitá výchylka
$A$	(-)	amplituda
$\theta$	(°C)	teplota
$\varphi$	(%)	relativní vlhkost
$R_1, R_2$	( $\Omega$ )	odpor
$C_1, C_2$	(F)	kapacita
$t$	(s)	doba záznamu
$l$	(m)	vzdálenost
$p$	(Pa)	absolutní tlak
$c$	( $m \cdot s^{-1}$ )	rychlost šíření vlny
$\omega$	( $rad \cdot s^{-1}$ )	úhlová rychlost
$f$	(Hz)	frekvence
$\lambda$	(m)	šířka vlnového pásma
C dělič	(-)	kapacitní dělič
$C_1, C_2$	(F)	kapacita
$D$	(-)	náhodná veličina
DC	(V)	stejnoseměrné napětí
$E_p$	( $kV \cdot mm^{-1}$ )	elektrická pevnost
$l$	(m)	vzdálenost
$P$ -value	(-)	hodnota pravděpodobnosti
$R_1, R_2$	( $\Omega$ )	odpor
$S_W^2$	(-)	vnitřní výběrový rozptyl
$t$	(s)	čas
$T$	(-)	doba jedné periody
$t_i$	(-)	průměrná hodnota pořadí veličin
$U_{max}$	(V)	maximální napětí
$U_{RMS}$	(V)	efektivní hodnota napětí
$U_s$	(V)	sdržené napětí
$W_\alpha$	(-)	kritický obor hodnot
$\bar{x}$	(-)	aritmetický průměr
$Y_{ij}$	(-)	pořadí veličin
$L$	dB	Hladina intenzity zvuku



## 2) Zkratky

Zkratka		Popis
WHO	World Health Organization	Světová zdravotnická organizace
CPB	Constant Percentage Band	FFT Analýza s konstantním % šířky pásma
VN		vysoké napětí
FFT		rychlá Fourierova transformace
WAV		zvukový formát (Waveform audio file format)
ČR		Česká republika
OS		osciloskop
PC		počítač
MS		měřicí systém
Hantek DSO		osciloskopická karta
Tr VN		vysokonapěťový transformátor
AKU		akumulátory
Al		hliník
VN		vysoké napětí



## Obsah:

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>14</b>
2.1	Záměr eliminace hluku elektrických zařízení .....	14
2.2	Rozpis řešení jednotlivých etap disertační práce .....	15
	Počítačové simulace a analýzy .....	15
	Vývoj a realizace měřicího pracoviště pro analýzu elektroakustických měničů .....	15
	Analýza parazitního hluku výkonových transformátorů .....	15
	Konstrukce modelu Protifázového eliminátoru .....	16
	Ověření funkčnosti modelu Protifázového eliminátoru hluku .....	16
	Série akustických a elektrických testů modelu .....	16
	Konstrukce prototypu Protifázového eliminátoru .....	17
	Aplikace prototypu na reálný transformátor .....	17
	Další modifikace prototypu pro jiná elektrická zařízení .....	17
<b>3</b>	<b>ZVUK, AKUSTIKA A PROBLEMATIKA HLUKU .....</b>	<b>18</b>
3.1	Zvuk .....	18
3.1.1	Šíření zvuku .....	18
3.1.2	Kmitočet zvuku .....	19
3.1.3	Vlnová délka .....	20
3.1.4	Amplituda zvuku .....	21
3.2	Sluchový orgán člověka .....	23
3.2.1	Zevní ucho .....	23
3.2.2	Vnitřní ucho .....	23
3.2.3	Střední ucho .....	23
3.3	Měření zvuku, hluku .....	24
3.3.1	Proč se měří zvuk? .....	25
3.3.2	Čím se měří zvuk? .....	26
3.3.3	Zvukoměr .....	26
3.4	Co je to hluk? .....	27
3.4.1	Veličiny charakterizující hluk .....	27



3.5	Zdravotní hodnocení hluku.....	29
3.5.1	Vztah mezi hlučností a výskytem ukazatelů zdravotního stavu populace .....	29
3.5.2	Negativní dopad hluku na zdraví člověka .....	31
3.5.3	Přehled účinků hluku na lidský organismus. ....	32
3.5.4	Zdroje hluku v životním prostředí a jejich význam z hlediska vlivu na populaci .....	33
3.6	Teorie hluku elektrických zařízení.....	36
3.6.1	Magnetický hluk .....	37
3.6.2	Aerodynamický hluk.....	38
3.6.3	Hluk způsobený ložisky .....	38
3.6.4	Mechanický hluk .....	38
3.6.5	Hluk transformátorů.....	38
3.7	Způsoby eliminace hluku .....	39
3.8	Protifáze .....	40
3.9	Systém eliminace hluku pomocí protifáze.....	43
<b>4</b>	<b>NÁVRH A REALIZACE PROTIFÁZOVÉHO ELIMINÁTORU .....</b>	<b>44</b>
4.1	Vývoj a realizace měřicího pracoviště pro analýzu elektroakustických měničů. ....	46
4.2	Analýza parazitního hluku výkonových transformátorů.....	49
4.2.1	Spektrální analýza transformátoru T615 ve stavu naprázdno .....	50
4.2.2	Spektrální analýza transformátoru T615 v zatíženém stavu .....	51
4.3	Konstrukce protifázového modelu .....	55
4.3.1	Schematické navržení protifázového modelu .....	55
4.3.2	Stavba modelu Protifázového eliminátoru.....	56
4.4	Výsledky testů modelu Protifázového eliminátoru .....	59
4.4.1	Měření hluku místnosti .....	60
4.4.2	Měření hluku transformátoru.....	61
4.4.3	Měření hluku po aktivaci Protifázového eliminátoru .....	62
4.4.4	Porovnání výsledků.....	63
4.4.5	Spotřeba modelu Protifázového eliminátoru .....	64
4.4.6	Zhodnocení výsledků testů modelu Protifázového eliminátoru .....	65
4.5	Konstrukce prototypu Protifázového eliminátoru .....	66
4.5.1	Výběr vhodného transformátoru .....	67



4.5.2	Návrh konstrukce.....	68
4.5.3	Stavba Protifázového eliminátoru .....	69
4.5.4	Umístění Protifázového eliminátoru .....	82
4.6	Zapojení prototypu Protifázového eliminátoru .....	83
4.6.1	Seznam použitých přístrojů .....	83
	Frekvenční generátor .....	83
	A/D a D/A převodník .....	83
	DI Box .....	84
	Digitální USB osciloskop .....	85
	Třetino-oktávový grafický ekvalizér .....	85
	Zesilovače .....	86
	SQN jednotka.....	87
	Oddělovací transformátor .....	88
4.6.2	Zapojení s frekvenčním generátorem.....	89
4.6.3	Zapojení se software ProTools .....	91
4.6.4	Zapojení používající DI Boxu .....	92
	Symetrické vedení signálu .....	92
4.6.5	Zapojení používající SQN jednotku.....	95
4.7	Měření prototypu Protifázového eliminátoru.....	97
4.8	Zhodnocení výsledků dosažených eliminátorem .....	99
4.8.1	Výsledky zaznamenané do polárních grafů.....	99
4.8.2	Spektrální analýzy působení Protifázového eliminátoru .....	102
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>104</b>

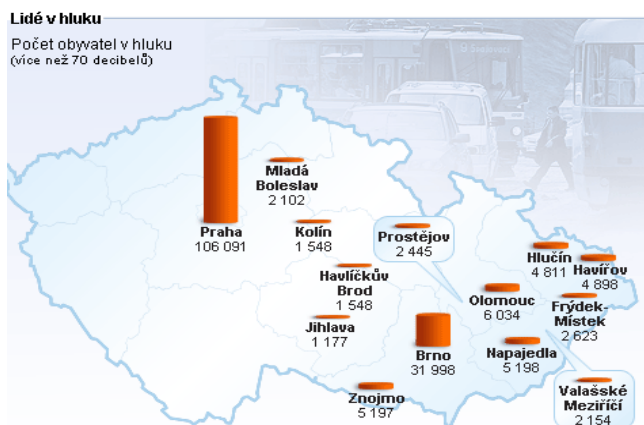


# 1 Úvod

V současné době je prioritou lidského snažení udržení zdraví lidské populace při jakékoliv činnosti. Neoddělitelným faktorem majícím nepříznivý vliv na lidský organismus je parazitní hluk kolem nás. Fyziologie člověka není uzpůsobena čelit hlukovým emisím, které v současné době člověk produkuje a tak jsou vydávána nařízení, vyhlášky, normy a směrnice upravující hladiny akustického tlaku působícího na člověka při nejrůznějších činnostech a v nejrůznějších prostorách. Cílem konstruktérů je tyto parazitní hluky co nejvíce eliminovat.

Za posledních pár století došlo na naší planetě k obrovskému nárůstu populace a mohutnému rozvoji techniky ve všech oblastech lidské činnosti. Ve většině vyspělých států se zvýšila hustota osídlení, lidé se stahují do větších aglomerací, kde se stalo nutností stavět výškové budovy, které pojmu daleko více obyvatel na malé zastavěné ploše. Toto je již samo o sobě obrovskou zátěží na psychiku lidí. Jenže lidé chodí do zaměstnání, chtějí uspokojovat své potřeby, nakupovat, cestovat, rychle se přemisťovat z místa na místo, všechny tyto potřeby se snaží naplňovat průmysl a jeho odvětví. [27]

Právě s rostoucí populací lidstva a průmyslu se tyto dva velice odlišné světy začínají stále více propojovat. Odlišné proto, že průmysl vyžaduje pro svůj život úplně jiné podmínky než člověk. Jedním z nežádoucích vlivů, které modernizace světa kolem nás přináší, je hluk. S tímto fenoménem začíná stále více lidí žít v prostředí, které svými hlukovými emisemi dlouhodobě překračuje limity. Člověk historicky tento problém řešil pokud možno vzdálením se od hlučných prvků, a když už nebylo vyhnutí, tak různými kryty nebo přímo stavbami, které jej chránily od producentů hlukových emisí. V určitém momentu těchto řešení se střetl trend zdravého životního stylu s nároky technického rozvoje a vývojáři museli začít uvažovat jak udělat stroje a přístroje méně hlučnými. Tento požadavek se tedy vnesl přímo do vývoje a konstrukce. Vznikly tak nejrůznější konstrukční řešení, kryty a také silentbloky, akusticky pohltivé materiály a nátěry. V současné době se však dostáváme do fáze, kdy ani tato řešení nestačí, a proto tato práce přináší nový systém, který by situaci mohl zlepšit. Tento systém pracuje na aktivní bázi. Pracuje tedy přímo s nežádoucími hlukovými emisemi, které dále zpracovává.



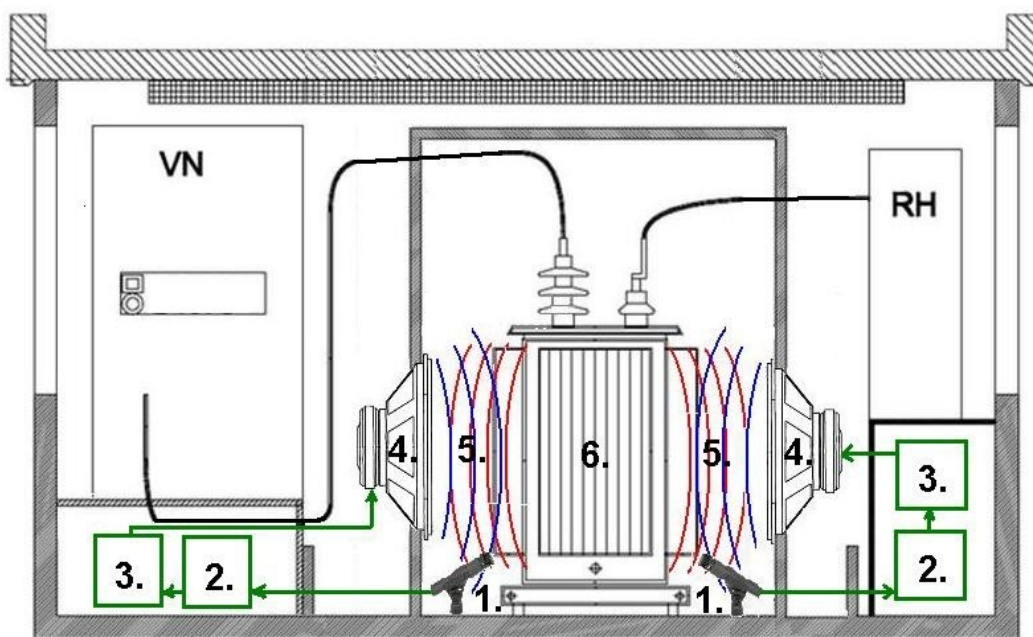
obr. 1-1 Mapa české republiky znázorňující počet obyvatel vystavených stálému působení akustického tlaku většího než 70dB [9]

## 2 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je návrh, vytvoření a ověření funkčního systému, který bude eliminovat hluk elektrických zařízení. Tento systém bude pracovat na aktivní bázi, bude tedy zpracovávat samotný parazitní signál a využívat jej k eliminaci hluku zařízení. V první fázi jde hlavně o eliminaci energetických zařízení, která hlučí velkou intenzitou, ale s malými frekvenčními výchyly. Ač je fyzikální princip samotného zařízení velice jednoduchý, ke splnění všech podmínek akustického zkratu je potřeba zajistit specifické prostředí, velkou řadu měření a testů. Tato disertační práce je koncipována jako praktický realizační projekt, jehož výsledkem je hotové funkční zařízení.

### 2.1 Záměr eliminace hluku elektrických zařízení

Počátečním zařízením testovaným na eliminaci pomocí protifáze budou výkonové transformátory. Jejich frekvenčně stálý hluk je ideální pro vzorkování a následné otočení tohoto signálu do protifáze. Výsledkem bude možnost omezení většiny do té doby používaných protihlukových opatření, například omezení protihlukových úprav budov. Budou moci být používány materiály elektrotechnických plechů, které vykazují zvyšování hlučnosti transformátorů, ale mají lepší magnetické vlastnosti. Celková konstrukce nebude do jisté míry tolik ovlivněna požadavky na hlučnost a zvýší se tedy účinnost samotných transformátorů. Konstrukce transformátoru bude také ekonomicky příznivější. Navrhovaná podoba systému je patrná z obr. 2-1.



- |                              |                    |
|------------------------------|--------------------|
| 1. Měřicí mikrofón           | 4. Reproduktor     |
| 2. Řídící jednotka protifáze | 5. Akustický zkrat |
| 3. Zesilovač                 | 6. Transformátor   |

obr. 2-1 Znáznornění systému eliminace hluku transformátoru pomocí protifáze

Po zdokonalení systému bude moci být prototyp (eliminátor) za dodržení určitých fyzikálních podmínek aplikován téměř na jakékoliv elektrické zařízení. Vše závisí na rychlosti vzorkování u digitálního zpracování, u analogového systému na zpoždění součástek a u obou současně na schopnosti aplikace přesné protifázové vlny. Také do jisté míry záleží na frekvenční různorodosti parazitního hluku. Japonským vědcům se podařilo pomocí protifáze snížit intenzitu městského hluku mezi frekvencemi 1÷3 kHz až o 20 dB, což je například jako rozdíl mezi intenzitou hluku v kancelářských prostorách a zapnutým vysavačem. Rozdíl je tedy velmi znatelný.

## 2.2 Rozpis řešení jednotlivých etap disertační práce

Jak je patrné z předchozích kapitol, vytvoření Protifázového eliminátoru hluku bude vyžadovat série akustických a elektrických měření, které budou krok po kroku určovat parametry pro navrhování jednotlivých komponent.

### Počítačové simulace a analýzy

Před zahájením tvorby modelu proběhly simulace odečtení signálů v počítačovém prostředí, kde byly ověřeny fyzikální principy odečítání otočených signálů a bylo testováno chování odchylek posunutí odečítaných signálů.

### Vývoj a realizace měřicího pracoviště pro analýzu elektroakustických měničů

Po ověření fyzikálního principu v počítačovém prostředí bylo započato s návrhem jednotlivých komponentů systému. Základním cílem této části byla volba elektroakustických měničů, jež jsou prvky pojící akustickou a elektrickou část systému.

- Měření a následný návrh mikrofону snímajícího parazitní hluku transformátoru
  - Výběr mikrofónů vhodných pro finální selekci
  - Vývoj systému automatického měření mikrofónů
  - Třídění naměřených dat
  - Tvorba směrových a frekvenčních charakteristik
  - Porovnání výsledků a finální výběr mikrofónu, jenž bude použit v systému
- Měření a následný návrh reproduktoru zajišťující produkovaní protifázové vlny
  - Konstrukce měřicího otočného stolu, který umožňuje měření šíření akustických vln z reproduktorů
  - Série měření reproduktorů
  - Porovnání výsledků
  - Finální výběr vhodných reproduktorů

### Analýza parazitního hluku výkonových transformátorů

Po určení vyhovujících elektroakustických měničů, při kterém byl zvolen vhodný typ mikrofónu, mohla být zahájena analýza samotného parazitního hluku, který je produkován transformátorem. Tento rozbor je důležitý pro určení nosných frekvencí hluku a hlavně také intenzity hlukových emisí. Kompletní analýza byla provedena v následujících bodech:

- Měření intenzity hlukových emisí provedené na čtyřech transformátorech v těchto stavech:

- Stav naprázdno
- Stav nízkého zatížení
- Provozní stav maximálního zatížení
- Pořízení záznamu hluku jednotlivých měření, jež jsou dále zpracovávány.
- Spektrální analýzy záznamů hlukových emisí.
- Tvorba spektrografů a 3D spektrogramů, které vypovídají o zastoupení jednotlivých frekvencí v zaznamenaných hlukových emisích.

Z pořízených výsledků bylo určeno, na jakou frekvenci se bude zařízení zaměřovat. Toto je velice důležité z důvodu celkové specifikace eliminátoru, který se zaměří jen na hlavní frekvence hlukových emisí. Tím dojde ke zjednodušení systému, který tím bude nejen ekonomičtější co do konstrukce, ale také do provozu, protože se tím sníží jeho energetická náročnost. Z praxe se také potvrzuje, že zjednodušením systému by mohla být zvýšena spolehlivost.

### **Konstrukce modelu Protifázového eliminátoru**

Po ověření funkčnosti systému v počítačových simulacích a navržení jednotlivých komponentů bude zahájena tvorba velkého fyzikálního modelu v laboratoři, který bude obsahovat prototyp Protifázového eliminátoru. Celý model se bude skládat ze dvou totožných stojanů osazených stejnými reproduktory, přičemž jeden funguje jako eliminátor samotný a druhý simuluje hlukové emise transformátoru. Zjednodušeně se dá říci, že v tomto modelu proti sobě vysílají signál dvě totožné reproduktorové soustavy. Signálovým zdrojem buzení jedné reprosoustavy je eliminátor samotný a druhé je počítač.

### **Ověření funkčnosti modelu Protifázového eliminátoru hluku**

S dokončením konstrukce celého modelu bude možné přejít z teoretického pole k praxi. Po uvedení modelu do chodu se začnou zjišťovat vlivy vzdáleností reproduktorů eliminátoru od zdroje hluku, vliv odrazivosti místnosti a mnoho dalších proměnných, které není možné nasimulovat nebo které se vyskytnou až u reálného modelu. V této fázi tedy dojde k prvotnímu spuštění eliminátoru.

### **Série akustických a elektrických testů modelu**

Po výsledném ustavení modelu, nalezení optimálních vzdáleností a eliminaci drobných poruch, které s sebou přináší spuštění prototypu, bude možno zahájit sérii akustických a elektrických testů, které potvrdí, nebo vyvrátí funkčnost modelu, jeho efektivitu a náročnost na provoz. Budou tedy provedena tato měření:

- Měření intenzity hluku před a po zapnutí Protifázového eliminátoru ve stanoveném rádiu, který odhalí také šíření hlukových a protifázových vln místností.
- Sestavení polárních grafů z výsledků měření intenzit.
- Porovnání spektrálních analýz před a po zapnutí Protifázového eliminátoru.
- Měření vlivu vzdálenosti reproduktoru eliminátoru od zdroje hluku.
- Měření spotřeby Protifázového eliminátoru při různých intenzitách vyzařovaného signálu.

## Konstrukce prototypu Protifázového eliminátoru

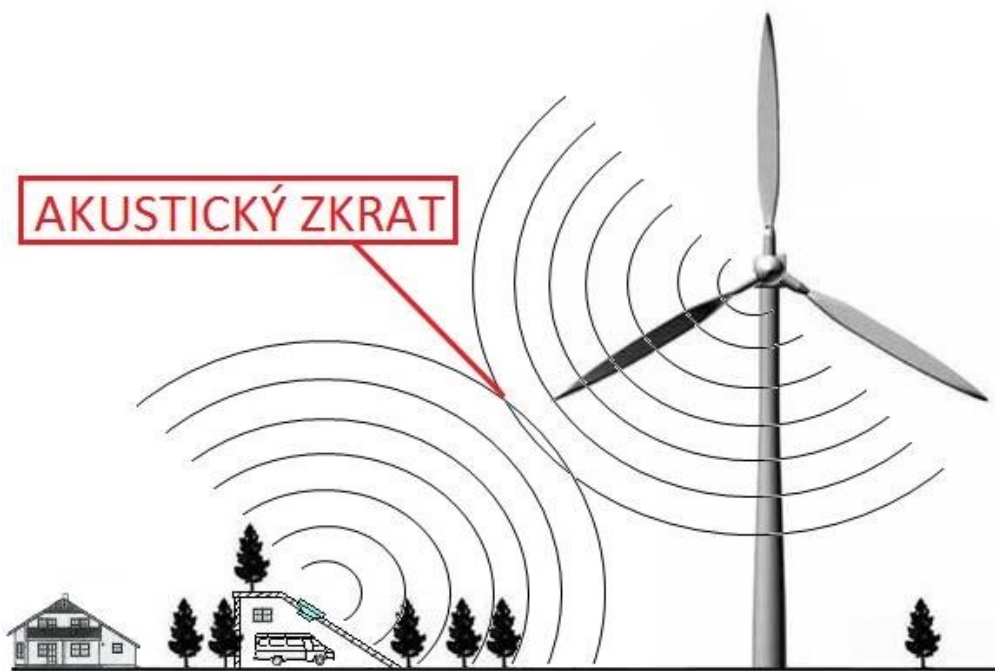
Po dokončení všech akustických a elektrických testů, které by měly potvrdit teoretickou a simulační část výzkumu, by mělo dojít ke konstrukci samotného prototypu Protifázového eliminátoru. Ten již bude zhotoven na míru vybraného transformátoru a bude na něm opět provedena série měření.

## Aplikace prototypu na reálný transformátor

Pokud všechna akustická měření potvrdí funkčnost zařízení a měření spotřeby elektrické energie nevyřadí eliminátor na základě ekonomické náročnosti, potom bude prototyp nainstalován do skutečného provozu k jednomu z měřených transformátorů. Budou zahájeny dlouhodobé testy, které ověří funkčnost a spolehlivost zařízení v reálných provozních podmínkách, což je také hlavním cílem celé disertační práce.

## Další modifikace prototypu pro jiná elektrická zařízení

Budoucností tohoto projektu je přenesení prototypu na mnohá další zařízení počínaje ledničkou až po tak hlukově složitá zařízení jako jsou větrné elektrárny, anebo elektrické stroje. Ty totiž mění během svého chodu nejen intenzitu hlukových emisí, ale i frekvenční rozsah. Navrhovaná podoba systému je patrná z obr. 2-2



obr. 2-2 Systém eliminace hluku větrné elektrárny pomocí protifáze [30]

### 3 Zvuk, akustika a problematika hluku

Zvuk je tak běžnou součástí každodenního života, že si moderní člověk sotva uvědomuje všechny jeho funkce a účinky. Přináší člověku uspokojení při poslechu hudby nebo ptačího zpěvu. Je také prostředkem dorozumívání mezi členy rodiny, přáteli jednotlivci nebo skupinami lidí. Může být prostředkem výstrahy a varování - např. sirény, různé houkačky nebo výstražná zařízení na přejezdech. V neposlední řadě nám také umožňuje kvalitativní a kvantitativní hodnocení nebo stanovení diagnózy, např. při klepání ventilů automobilů nebo srdečních šelestech.

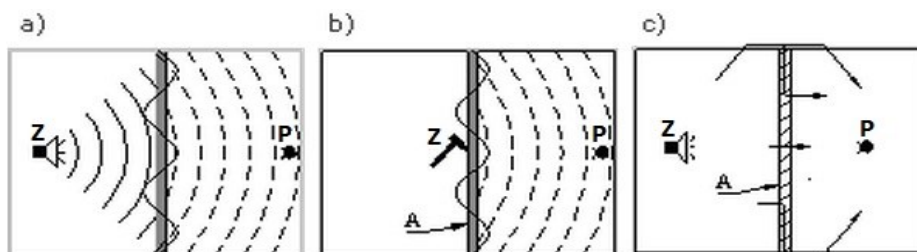
#### 3.1 Zvuk

Zvuk vzniká tím, že jakékoliv kmitající těleso – ať už je to motor tryskového letadla, struna houslí nebo lidské hlasivky – rozkmitává vzduch, který ho obklopuje a ten své kmity předává dál a dál, až nakonec dopadnou na bubínek, jehož chvění stojí na začátku zázraku, kterému říkáme slyšení. Jeho výška závisí na počtu kmitů za sekundu a udává se v hertzech (Hz). Čím vyšší je počet kmitů, tím větší je frekvence (zvuk – tón).

Zvukem se nazývají všechny změny tlaku (v plynném, kapalném i tuhém prostředí), které jsou rozeznatelné lidským sluchem. Můžeme jej definovat jako mechanické vlnění pružného prostředí v daném kmitočtovém intervalu. [27]

##### 3.1.1 Šíření zvuku

Šíření zvukových vln ve vzduchu lze přirovnat k šíření vln na vodní hladině, do které byl vhozen kámen. Vlny se šíří rovnoměrně ve všech směrech a jejich amplituda se postupně zmenšuje při vzdalování se od zdroje. Při každém zdvojení vzdálenosti od zdroje ve vzduchu se amplituda zvukových vln zmenšuje na polovinu, což odpovídá snížení hladiny zvuku o 6 dB. Tedy při přemístění posluchače nebo zvukoměru ze vzdálenosti 1 m od zdroje do místa vzdáleného 2 m od zdroje zvuku, hladina akustického tlaku klesne o 6 dB. Přemístění do vzdálenosti 4 m od zdroje hluku odpovídá snížení hladiny o 12 dB, ve vzdálenosti 8 m od zdroje klesá hladina o 18 dB atd. Výše uvedené pravidlo platí však pouze tam, kde šíření zvuku nestojí v cestě žádné překážky a kde nejsou přítomny zvuk odrážející objekty. Takové ideální podmínky šíření zvuku se nazývají „podmínkami volného pole“. [35]



obr. 3-1 Šíření zvuku (A - plocha dělící konstrukce, Z - zdroj, P – přijímač) [13]

Způsob šíření zvuku: a) vzduchem, b) kmitáním, c) konstrukcí vedlejšími cestami



Při umístění jakéhokoliv objektu do cesty šíření zvukové vlny bude část zvukové energie odražena, část pohlcena a část bude přenesena objektem (viz obr. 3-1). Velikost podílů odražené, pohlcené a přenesené zvukové energie závisí na akustických vlastnostech objektu, jeho rozměrech a vlnové délce zvuku. Obecně platí, že objekt narušuje výrazně zvukové pole tehdy, jsou-li jeho rozměry větší než délka vlny zvuku, tvořícího toto pole. Například zvuk s kmitočtem 10 kHz má vlnovou délku pouze 3,4 cm, a proto i tak malé předměty jako měřicí mikrofón, narušují jím vytvářené zvukové pole. Malá vlnová délka je však výhodná z hlediska zvukové izolace a tlumení (pohlcování) zvuku. Izolace zvuku s kmitočtem 100 Hz (délka vlny 3,4 m) je podstatně obtížnější než izolace zvuku s vysokými kmitočty. Tato skutečnost se často projevuje více či méně nepříjemně v každodenním životě - hudbu z radiopřijímače v sousedním pokoji podstatně zeslabují zdi a dveře, avšak hluboké tóny se šíří téměř nerušeně do ostatních místností. [27]

### 3.1.2 Kmitočet zvuku

Počet změn za jednotku tlaku určuje kmitočet zvuku, jehož mezinárodně uznávanou jednotkou je Hz (Hertz) s rozměrem  $1 \cdot s^{-1}$ . Kmitočet je veličinou umožňující popis totálních vlastností zvuku. Např. hřmění bouřky je příkladem zvuku s nízkým kmitočtem, opakem je píšťalka, která vydává zvuk s vysokým kmitočtem.

Kmitočtový rozsah sluchu zdravého mladého člověka sahá přibližně od 20 do 20 000 Hz (20 kHz), zatímco rozsah klavíru je mezi nejnižšími a nejvyššími tóny s kmitočty 27,5 Hz a 4186 Hz. Zvuky s kmitočtem nižším než 20 Hz se nazývají infrazvuky a zvuky kmitající rychleji než 20 000 Hz nazýváme ultrazvuky. Lidské ucho vnímá nejcitlivěji zvuky o kmitočtech 2000 až 3000 Hz. V tomto rozmezí rozliší člověk rozdíly zvuků, jejichž kmitočty se liší o 3 až 9 Hz. Zkušení hudebníci jsou schopni rozlišit ještě menší. Malý netopýr vysílá za letu ultrazvukové signály. Dopadne-li signál na překážku, odrazí se zpět, netopýr jej zachytí svým sluchem a podle doby, která uplynula mezi vysláním a zachycením odraženého signálu, určí zcela instinktivně vzdálenost překážky a vyhne se jí.

Tlakové změny se šíří pružným prostředím (např. vzduchem) od zdroje zvuku ke sluchovému orgánu posluchače. Pojem rychlosti šíření zvuku a její přibližná hodnota jsou lidem známy již od školních let z běžně používaného způsobu určení vzdálenosti bouřky, kdy mezi zablesknutím a zvukem hromu se počítá přibližně 3 sekundy na jeden kilometr. Tato přibližná hodnota odpovídá rychlosti šíření zvuku, která činí  $1238 \text{ km} \cdot \text{hod}^{-1}$ . V akustice se však zpravidla rychlost šíření zvuku udává v  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , tj.  $344 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , při normální pokojové teplotě. Zvuk se šíří od svého zdroje v kulovitých plochách rovnoměrně na všechny strany. Ve vodě se rychlost zvuku zvyšuje na  $1450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a ocel vede zvuk rychlostí  $5100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Narazí-li zvukové vlny na překážku, která je vyšší než vlnová délka dopadajících zvukových vln, odrazí se a za překážkou vzniká tzv. zvukový stín. Je-li překážka menší, zvukové vlny ji obejdou, spojí se za ní a šíří se dál [35].

### 3.1.3 Vlnová délka

Vlnová délka je fyzikální vzdálenost mezi jednotlivými periodicky se opakujícími maximy či minimy tlaku a na základě znalosti kmitočtu a rychlosti šíření zvuku, je možno ji jednoduše vypočítat ze vztahu:

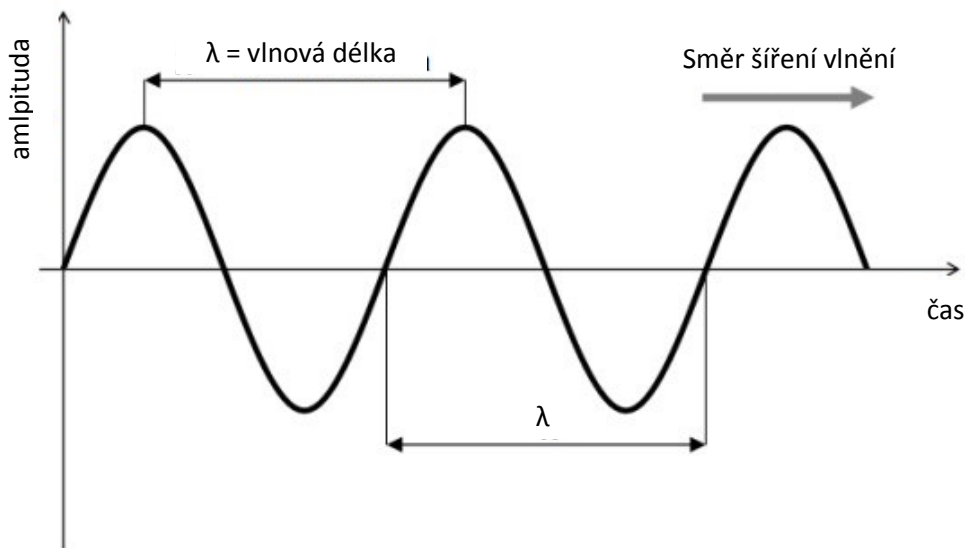
$$\text{délka vlny } (\lambda) = \frac{\text{rychlost šíření zvuku}}{\text{kmitočet}} \text{ (m)}$$

(r. 3-1) [27]

Délka vlny zvuků se udává v metrech a s pomocí uvedeného vztahu je možné ji určit s různými kmitočty. Například, ve vzduchu se šířící zvuk s kmitočtem 20 Hz má vlnovou délku přibližně 17 m, kdežto délka vlny zvuku s kmitočtem 20 kHz, je v tomtéž prostředí pouze 1,7 cm. Obecně tedy platí, že zvuky s vysokými kmitočty mají malou vlnovou délku, zatím co délka vlny zvuků nízkými kmitočty je velká.

Zvuk, jehož změny tlaku probíhají s jedním kmitočtem, se nazývá čistý tón. Čisté tóny se v praxi vyskytují jen zřídka a většina zvuků obsahuje složky s různými kmitočty. Dokonce jednotlivé tóny klavíru mají složitý tvar vlny a obsahují řadu složek.

Hluk většinou obsahuje celou řadu složek s různými kmitočty a má tedy povahu širokopásmového šumu. Hluk, jehož složky jsou rovnoměrně rozloženy v pásmu akustických kmitočtů, se často nazývá bílým šumem. Sluchový vjem takového akustického signálu je obdobný vjemu zvuku, působeného proudící vodou.[35]



obr. 3-2 Vlnová délka [8]



### 3.1.4 Amplituda zvuku

Další veličinou, sloužící k popisu a hodnocení zvuku, je amplituda odpovídajících změn tlaku. Nejslabší zvuk, zaznamenaný nepoškozeným lidským sluchem, je charakterizován akustickým tlakem dvaceti milióntin základní jednotky tlaku 1 Pa (Pascal), tj. 20  $\mu$ Pa. Tato hodnota je 5 000 000 000 x menší než normální barometrický tlak. Změna tlaku s hodnotou 20  $\mu$ Pa je tak malá, že vyvolává výchylku ušního bubínku, jež je menší než průměr jediné molekuly vodíku. Naproti tomu je překvapivé, že lidský sluch je schopen snášet akustický tlak s hodnotami více než miliónkrát většími. Z toho vyplývá, že vyjadřování amplitudy zvuku pomocí základních jednotek (Pa) akustického tlaku vede k nepřehledným číselným údajům a proto se v akustice běžně používá logaritmická stupnice a s ní související hladiny s jednotkami decibel (dB) [27].

Decibel není absolutní, ale relativní jednotkou, která se vztahuje k dohodnuté vztažné hodnotě. Hodnota hladiny akustického tlaku  $L_p$  je matematicky vyjádřena logaritmickou funkcí a je definována vztahem:

$$L_p = 10 \log \left( \frac{p}{p_0} \right)^2 \text{ (dB)} \quad (\text{r. 3-2}) [35]$$

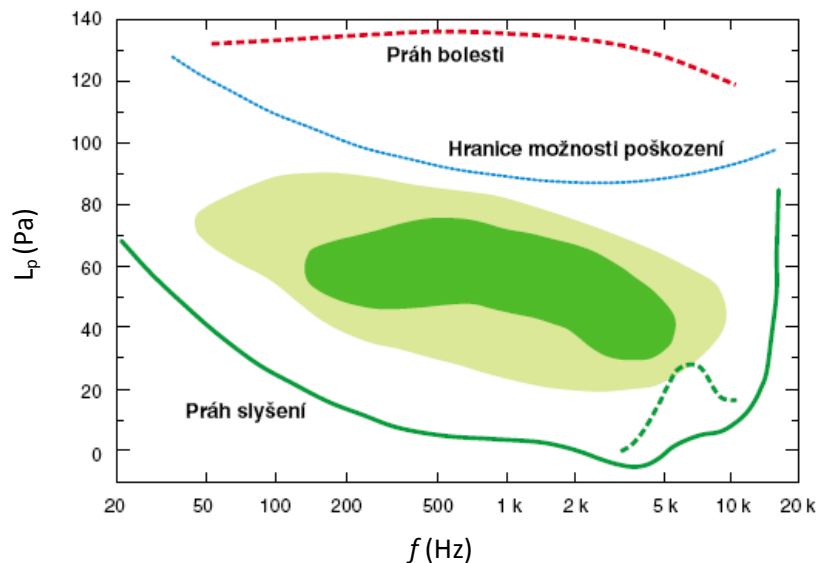
kde je  $p$  (Pa) - sledovaný akustický tlak (efektivní hodnota)

$p_0$  (Pa) - referenční akustický tlak ( $2 \cdot 10^{-5}$  Pa)

Logaritmická decibelová stupnice má jako výchozí bod (vztažnou hodnotu) prahovou hodnotu akustického tlaku, tj. 20  $\mu$ Pa. Tomuto bodu odpovídá hladina 0 dB. Každému zesílení akustického tlaku v Pa odpovídá zvýšení hladiny o 20 dB a tedy akustickému tlaku 200  $\mu$ Pa, odpovídá hladina 20 dB vzhledem k 20  $\mu$ Pa, tlaku 2000  $\mu$ Pa hladina 40 dB atd. Logaritmická stupnice s dB tedy komprimuje rozsah 1 000 000 : 1 do rozsahu (0 ÷ 120) dB.

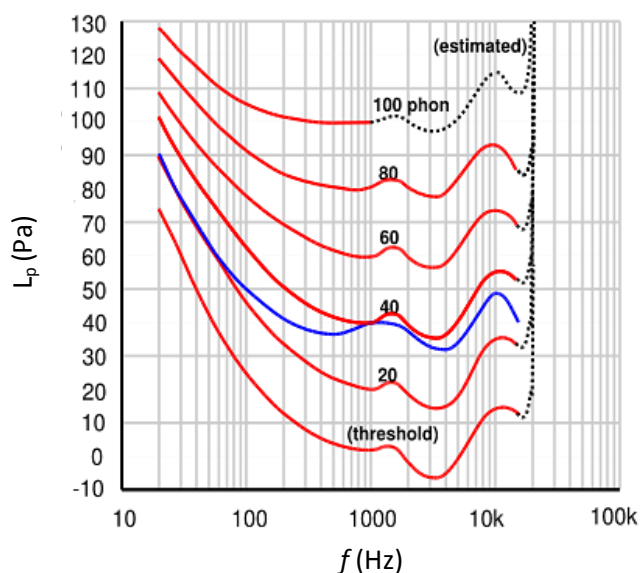
K přednostem logaritmické stupnice s jednotkami dB patří také to, že lépe odpovídá subjektivnímu sluchovému vjemu relativní hlasitosti než lineární stupnice s jednotkami Pa. Odůvodnění spočívá ve vlastnosti lidského sluchu, jež reaguje na relativní změny akustického tlaku. Tato reakce odpovídá logaritmické zákonitosti a stupnici, na které v libovolném místě rozdíl hladiny 1dB vyjadřuje tutéž relativní změnu akustického tlaku.

Z hlediska dynamického rozsahu se slyšitelné pásmo rozprostírá od prahu slyšitelnosti (viz obr. 3-3), jemuž odpovídá hladina akustického tlaku 0 dB ku prahu bolestivosti, tj. k vyšší než 130 dB hladině akustického tlaku. [35]



obr. 3-3 Práh slyšitelnosti [3]

Frekvenční závislost lidského sluchu vedla k definování “křivek stejné hlasitosti”, tedy křivek, které respektují různou citlivost sluchu při různých frekvencích a hladinách akustického tlaku. Stupnice zůstává logaritmická, ovšem označení dB se nahradilo novou jednotkou Phon (1 Ph, jeden “fon”). Jako referenční kmitočet byl zvolen 1 kHz a na tomto kmitočtu číselně odpovídá číselné vyjádření v dB stupnici ve phonech. Stupnice hlasitosti ve phonech tedy oprošťují hlasitost zvuku od frekvenční závislosti a vyjadřují tedy subjektivně vnímanou hladinu hlasitosti zvuku, bez ohledu na frekvenci. Tyto křivky vypadají podobně jako průběh prahu slyšitelnosti na obr. 3-3, jen se pro zvyšující se hlasitost postupně “zplošťují” (hlavně na nejnižších kmitočtech je nárůst podstatně menší), minima a maxima (extrémy) však zůstávají přibližně stejná (viz obr. 3-4). [27]



obr. 3-4 Křivky stejné hlasitosti a citlivosti lidského ucha [2]

## 3.2 Sluchový orgán člověka

Lidské ucho je zástupcem jednoho z nejdůležitějších lidských smyslů, hned po zraku se touto cestou zpracovává nejvíce podnětů. Sluchový orgán je pozoruhodný nejen svou anatomickou stavbou a funkcí, ale také přesností, se kterou pracuje. Počínaje membránou bubínku, která díky své miniaturní tloušťce dokáže rozeznávat velmi malé rozdíly akustického tlaku, přicházející vnějším zvukovodem až po vláskové buňky Cortiho orgánu, které dokážou zaznamenat výchylku blížící se průměru velikosti atomu vodíku. Z technického hlediska jde o tlakový akustický snímač. Je to jeden z nejvýznamnějších lidských smyslů, jehož funkce není dodnes do detailů prozkoumána (resp. Objasnění, proč člověk občas slyší to, co slyší). Lidské ucho jakožto měřicí přístroj schopný bez poškození zpracovávat signály v rozsahu 0 - 140 dB (nad 140 dB dochází k trvalému poškození). To představuje rozsah akustických tlaků  $2 \cdot 10^{-5}$  - 200 (Pa), respektive poměr 1:10 000 000. Tento rozsah hodnot dokáže zpracovat jen málokteré jiné čidlo.

### Ucho se skládá ze tří částí:

- zevního ucha
- středního ucha
- vnitřního ucha

#### 3.2.1 Zevní ucho

Zevní ucho se skládá z boltce a zvukovodu. Boltce více méně určuje směrovou charakteristiku od cca 500 Hz a maximální lokalizace binaurálního slyšení leží v oblasti kolem 5 kHz. Zvukovod je pak oválná trubice dlouhá přibližně 25 mm o poloměru kolem 8 mm. Zvukovod vlastně představuje rezonanční obvod v pásmu 2÷6 kHz, který patřičně ovlivňuje frekvenční charakteristiku příchozího signálu.

#### 3.2.2 Vnitřní ucho

Vnitřní ucho v sobě kombinuje sluchové a rovnovážné ústrojí. K převodu chvění vnitřního ucha na elektrické nervové podněty dochází v hlemýždi. Výsledné nervové podněty pak vyhodnocuje mozek.

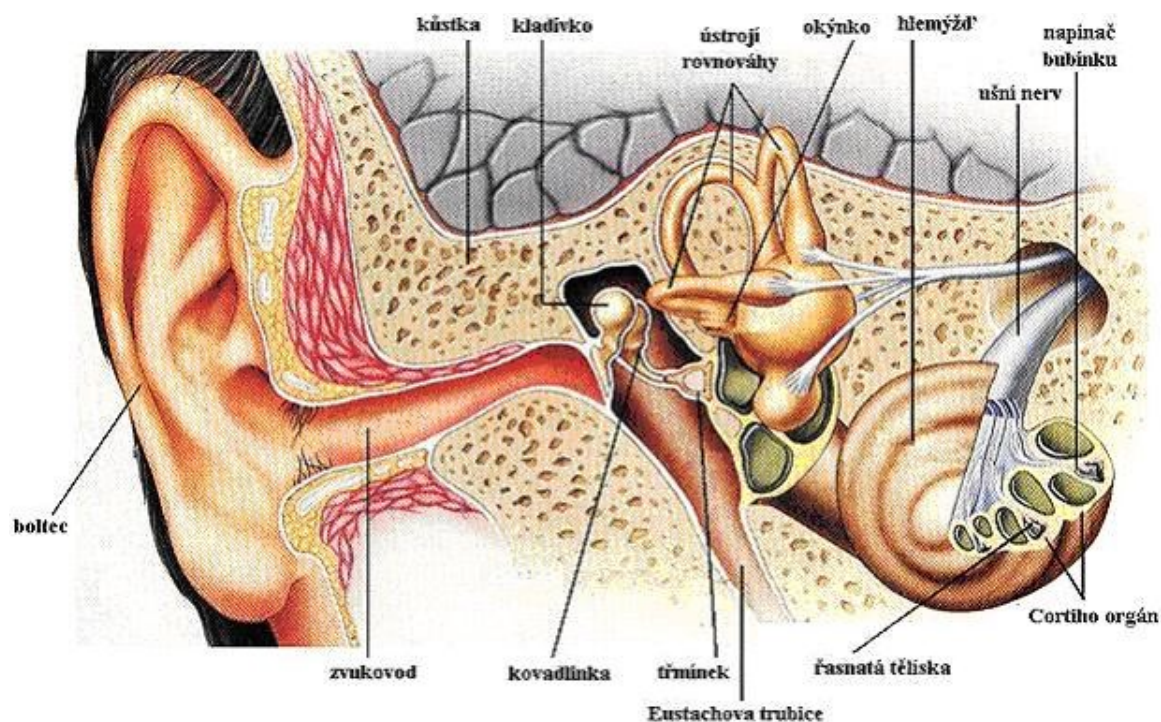
#### 3.2.3 Střední ucho

e skládá z bubínku, kladívka, kovádlíčky, třmínku, napínače bubínku a Eustachovy trubice (viz obr. 3-5), která pojí střední ucho s nosohltanem.

Zvukové vlny, které projdou zvukovodem, rozechvívají bubínek. Ten se vlastně chová jako membrána mikrofону. Jeho rozměry a mechanické vlastnosti (tuhost atd.) jsou po tvaru boltce a rozměrech zvukovodu dalšími veličinami ovlivňujícími frekvenční charakteristiku a citlivost ucha. Zároveň bubínek odděluje střední a vnější ucho. Případné změny barometrického tlaku se vyrovnávají přes Eustachovu trubicu při každém polknutí.

Kladívko, stejně jako koválinka, tvoří jakýsi mechanický pákový (impedanční) převodník, který přenáší kmity bubínku přes třmínek na chvění tekutiny vnitřního ucha. Střední ucho se tedy dá přirovnat k páce, jejímž delším koncem pohybuje bubínek a kratší konec je připevněn ke třmínku. Kmity třmínku tedy mají menší výchylku, než-li bubínek, za to je však třmínek schopen vyvinout větší sílu potřebnou k rozkmitání tekutiny vnitřního ucha.

Navíc je střední ucho schopno plnit i ochrannou funkci změnou převodních parametrů. O to se stará napínač bubínku a třmínkový sval. Tyto svaly se stahují při překročení hladiny akustického tlaku cca 70 dB (se zpožděním cca  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). To je možné si ověřit snadným pokusem. Pokud v tiché místnosti tlesknete, uslyšíte v uších slabé lupnutí, jako by vám na okamžik zalehlo ucho. Toto lupnutí je důsledkem činnosti těchto svalů. [27], [35]



obr. 3-5 Střední ucho [5]

Zajímavostí lidského ucha je fakt, že nejmenší akustický tlak, který je schopen vyvolat u člověka sluchový vjem, rozkmitá membránu bubínku výchylkou, která je rovna průměru atomu Vodíku. [41]

### 3.3 Měření zvuku, hluku

Jako každá fyzikální veličina je i zvuk možno měřit a to hned z několika fyzikálních úhlů pohledu a v několika veličinách. Vzhledem ke vzrůstající problematice hlukových emisí se měření zvuku stalo certifikovanou činností, která je schopna na základě svých zjištění zasahovat do konstrukce výrobků, staveb nebo upravovat životní prostředí vzhledem k odstranění zdrojů hluku.

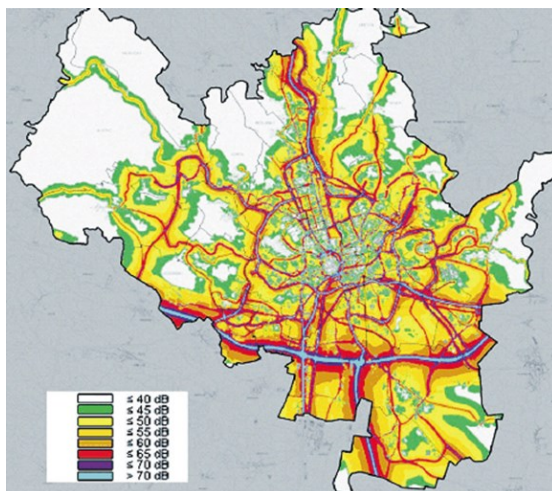
### 3.3.1 Proč se měří zvuk?

Měření popisují přesně definované veličiny, umožňující kvalitativní a kvantitativní popis zvuku. Na základě výsledků měření mohou být zlepšeny akustické vlastnosti staveb i reproduktorů a zvýšen požitek z poslechu hudby, ať již doma nebo v koncertní síni.

Výsledky měření jsou základním podkladem pro přesné vědecké analýzy a hodnocení rušivých zvuků. Zde je třeba připomenout, že míru rušivých účinků na jednotlivce nelze přesně určit, neboť je nutno počítat s individuálními fyziologickými a psychologickými faktory. Na základě výsledků měření však lze objektivně porovnávat rušivé zvuky a hluky působící v různých prostředích.

Akustická měření jasně indikují hranice potencionální nebezpečnosti zvuku či hluku a naznačují možnosti a cesty jeho snižování. Audiometrická měření umožňují kontrolu parametrů sluchu jednotlivců. Z toho vyplývá, že akustická měření jsou důležitou částí akcí spadajících do oblasti ochrany zdraví, jmenovitě ochrany sluchu. V neposlední řadě jsou měření a analýza zvuku účinnými nástroji v boji proti hluku, ať již v okolí letišť, dálnic, železničních tratí nebo v továrnách, obytných místnostech a nahrávacích studiích. Tyto nástroje napomáhají zvyšování celkové kvality životního prostředí lidí [20].

Dlouhodobými měřeními a následnou analýzou hluku na různých vybraných místech si ověřujeme, jaká tam je hlučnost a jak se mění během dne a noci. Výsledky těchto měření jsou podkladem pro sestavení hlukové mapy města, v níž se pomocí izofón, tj. křivek spojujících stejně hlučná místa, vymezí nejhlučnější a nejklidnější území města. Naměřené hodnoty je možné kombinovat s výpočty na základě simulace, výsledkem je pak kvalitní mapa hluku z dopravy, která nám ukáže ucelený přehled o hlukových poměrech daného sídla. Podle ní je možné se rozhodnout, kudy by měly vést frekventované silnice nebo železniční trati a kde jsou příhodná místa pro stavbu škol, lékařských zařízení, rehabilitačních center a v neposlední řadě oblasti pro aktivní a pasivní odpočinek obyvatel. [27] Na obr. 3-6 lze vidět ukázkou hlukové mapy obce s procházející silnicí I. třídy. [1]



obr. 3-6 Hluková mapa [1]



### 3.3.2 Čím se měří zvuk?

Jak již bylo řečeno, zvukem se nazývají všechny změny tlaku v okolních prostředích, které jsou rozeznatelné lidským sluchem.

Tedy nejběžnějším přístrojem na měření tlaku vzduchu je barometr. Změny tlaku, související se změnami počasí, jsou však tak pomalé, že je lidský sluch nerozeznává, a proto nemohou být nazývány zvukem.

Tím jsou nazývány rychlejší změny tlaku, tj. změny tlaku, které probíhají rychleji než 20x za sekundu. Je nutné říct, že zmíněný barometr nestačí správně reagovat na rychlé změny tlaku a k měření zvuku tedy není vhodný. Proto se používá zařízení, které se nazývá zvukoměr. [11]

### 3.3.3 Zvukoměr

Je elektronické měřicí zařízení (viz obr. 3-7), reagující na zvuk podobně, jako lidský sluch a umožňující objektivní měření jeho hladiny. Zvukoměrná zařízení různých výrobců se vzájemně mohou lišit v detailech konstrukce a provedení, ale všechna bez rozdílů obsahují mikrofon, ústrojí na zpracování signálů a indikační zařízení.

Kvalitní měřicí mikrofon převádí na něj dopadající zvuk v ekvivalentní elektrický signál. Nejvhodnějším mikrofonom pro zvukoměry je kondenzátorový mikrofon, k jehož přednostem patří přesnost, spolehlivost a stabilita. Elektrický signál na výstupu mikrofону má zpravidla malé amplitudy a proto musí být ještě před dalším zpracováním náležitě zesílen odpovídajícím předzesilovačem. Zesílený elektrický signál je možno zpracovat různými způsoby pomocí odpovídajících elektronických zařízení. Jednou z možností je použití váhových filtrů.

Váhové filtry jsou poměrně jednoduchá zařízení, jejichž kmitočtové charakteristiky odpovídají charakteristikám lidského sluchu, tj. křivkám stejné hlasitosti. Nejrozšířenější a mezinárodně standardizované jsou zvukoměrné váhové filtry, označované A, B a C váhový filtr A zpracovává měřený signál se zřetelem na pokud možno dokonalou aproximaci převrácené křivky stejné hlasitosti odpovídající nízkým hladinám akustického tlaku. Kmitočtová charakteristika váhového filtru B odpovídá převrácené křivce stejné hlasitosti v oblasti středních hladin akustického tlaku. Podobně váhový filtr C má kmitočtovou charakteristiku útlumu, aproximující převrácenou křivku stejné hlasitosti pro vysoké hladiny akustického tlaku. Při měření leteckého hluku se používá speciální zvukoměrný váhový filtr D, jehož parametry jsou také stanoveny mezinárodními doporučeními a normami.

Moderní zvukoměry jsou vybaveny nejméně jedním z těchto váhových filtrů a zpravidla také umožňují měření bez použití váhových filtrů, tj. měření s použitím lineární kmitočtové charakteristiky. Odpovídající režim je zpravidla označen zkratkou „Lin“.

Je nutno poznamenat, že v současné době je nejrozšířenější použití váhového filtru A. Příčina méně častého užití váhových filtrů B a C spočívá v tom, že odpovídající výsledky měření nesouhlasí

dobře s výsledky subjektivních zkoušek. Jedním z hlavních důvodů nesouhlasu uvedených výsledků je to, že jako použité za základ křivky stejné hlasitosti byly odvozeny při použití čistých tónů, zatímco většina běžných zvuků a hluků nemá tonální povahu, ale představuje složité akustické signály s mnoha složkami. [26], [27]



obr. 3-7 Zvukoměr [6]

### 3.4 Co je to hluk?

V moderní vyspělé společnosti je však zvuk často a někdy až příliš často nepříjemným, rušivým nebo až nebezpečným činitelem. Řadu zvuků je proto možno označit jako nežádoucí zvuky nebo souhrnně jako hluk. Je nutno připomenout, že míra nepříjemnosti a dusivosti není určena jen jeho fyzikálními parametry, ale také subjektivním postojem jeho dobrovolných nebo nedobrovolných posluchačů. Pro leteckého konstruktéra může být hluk, který vytváří jeho navržený motor, rajsskou hudbou, pro obyvatele žijící v okolí letiště však může být nesnesitelnou zátěží.

Zvuk či hluk však nemusí být ani příliš silný, a přesto může být nepříjemný či rušivý. Praskající podlaha, skřípot pera při psaní nebo netěsný kapající vodovodní kohoutek, mohou být zdroji zvuků co do účinků stejně rušivých, jako silné hřmění.

Nejhorší vlastností zvuku a hluku je však jeho potenciální nebezpečnost spočívající v možnosti způsobení přechodných či trvalých škod. Aerodynamický třesk může být příčinou poškození oken a popraskání omítky, avšak nejhorší ze všeho je, když zvuk způsobí poškození nejjemnějšího a současně i nejsložitějšího zařízení k jeho příjmu - lidského sluchu.[27]

#### 3.4.1 Veličiny charakterizující hluk

Jako základní deskriptor pro charakterizování hluku slouží hladina akustického tlaku  $L_p$  (dB), která je vztažena k referenčnímu akustickému tlaku  $20 \mu\text{Pa}$ . Ten odpovídá prahu slyšení na kmitočtu 1 kHz.

Hladina akustického tlaku je dána vztahem:

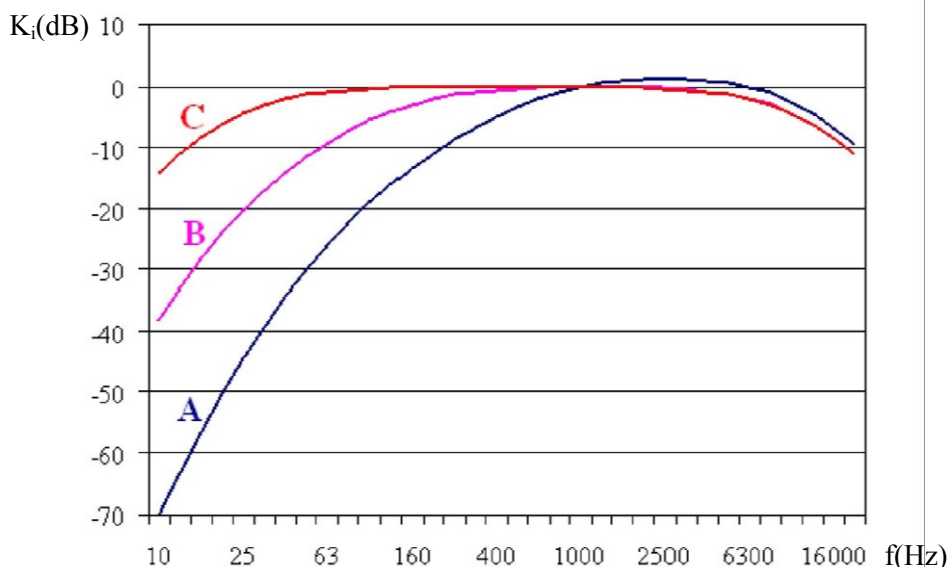
$$L_p = 10 \log \left( \frac{p}{p_0} \right)^2 (dB) \quad (r. 4.1 - 1) [25]$$

kde jsou:  $p$  – akustický tlak v daném bodě akustického prostoru [Pa]  
 $p_0$  – referenční akustický tlak ( $2 \cdot 10^{-5}$  Pa)

Vyjádření míry hluku v decibelech umožňuje přehlednější třídění hlukových údajů a vystihuje fyziologii sluchu (lineární přírůstek sluchového vjemu odpovídá logaritmu změny podnětu). Dynamický rozsah akustického tlaku se pohybuje od prahu slyšení  $20 \mu\text{Pa}$  do prahu bolesti  $200 \text{ Pa}$ , což odpovídá rozsahu  $140 \text{ dB}$ . Lineární přírůstky hladin odpovídají kvadratickému nárůstu hodnot akustického tlaku. Například těsně nad prahem slyšení je nárůst hladiny akustického tlaku o  $2 \text{ dB}$  nevýznamný, na  $100 \text{ dB}$  však stejný nárůst znamená podstatný nárůst hluku.

Citlivost lidského sluchu není v závislosti na kmitočtu slyšitelného rozsahu zvuku konstantní. Nejvyšší citlivost se pohybuje v rozsahu kmitočtů  $1 \div 4 \text{ kHz}$ . Směrem k obou krajním mezím slyšitelného rozsahu pak citlivost sluchu výrazně klesá. Aby bylo možné jednoduše určit hlukovou expozici, které jsou lidé vystaveni, zavádějí se do měřicího řetězce zvukoměru tzv. váhové filtry. Jak již bylo uvedeno výše, v dnešní době uvažujeme hlavně váhový filtr A, filtr B již ztratil svůj význam. V některých případech se uplatňují ještě také filtry C a D (letecká doprava).

U váhových filtrů jsou zavedeny tzv. korekce  $K_i$ , kterými jsou hlukoměry běžně vybaveny. Ke každé skutečně změřené hladině zvuku přičte příslušnou korekci a přepočte hladinu zvuku tak, jak ji vnímá lidský sluch. Závislost korekce  $K_i$  na frekvenci pro váhové filtry A, B, C je zobrazena na obr. 3-8.



obr. 3-8 Průběhy váhových křivek filtrů typů A, B a C [25]

Odečítání okamžitých hladin akustického tlaku  $p_A$  a jejich průměrování v čase není v reálných podmínkách příliš vhodné, pro hodnocení hluku v životním prostředí se proto zavedlo praktičtější vyjádření pomocí ekvivalentní hladiny akustického tlaku  $L_{AeqT}$ . Ekvivalentní hladina akustického tlaku  $L_{AeqT}$  odpovídá energeticky stejné hladině akustického tlaku, která by byla konstantní po celou dobu trvání expozice  $T$  tj. [25]



$$L_{AeqT} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] \text{ (dB)} \quad (\text{r. 3 -3}) [25]$$

Kde:

- T – stanovený časový interval (s)  
p<sub>A</sub>(t) – akustický tlak A v čase t (Pa)  
p<sub>0</sub> – referenční akustický tlak (20.10<sup>-5</sup> Pa)

### 3.5 Zdravotní hodnocení hluku

Zdravotní hodnocení hluku má tři hlediska:

- hladinu projevující se jako hlasitost zvuku,
- frekvenční složení projevující se jako výška a barva,
- časový průběh hlukové události a její doba trvání.

Vnímání hluku je čistě subjektivní pocit, který se může lišit s vysokou mírou individuality. I když je hluk vnímán subjektivně, je nutné stanovit teoretickou fyzikální míru přípustné hlukové expozice. Pro působení hluku v subjektivní sféře byly zavedeny čtyři diferencované pojmy pro charakterizaci účinků na člověka. Jsou to:

- rušení, při němž hluk interferuje s nějakou činností (spánkem, duševní prací, řečovou komunikací apod.),
- rozmrzelost a pocit nepohody, vznikající působením hluku a prožívané negativně hlukem postiženým člověkem nebo skupinou,
- hlučnost, což je subjektivní hodnocení pocitu s nepatřičností hluku v konkrétním prostředí,
- obtěžování, což představuje nepřípustné ovlivňování životního prostředí, případně skupinových či osobních práv.

Dle světové zdravotnické organizace WHO rozlišujeme působení hluku dle jeho intenzity a doby expozice (noc/den) na hluk, který způsobuje: poškození lidského zdraví ve formě zhoršení sluchu, zhoršení srozumitelnosti a komunikace řeči, poruchy spánku a fyziologických funkcí lidského organismu jako jsou například zvýšení krevního tlaku, ischemická choroba srdeční a v neposlední řadě mentální onemocnění v podobě nejrůznějších neuróz atd.

Legislativně je v ČR řešena zátěž životního prostředí hlukem Zákonem č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví ve znění posledních změn a doplňků a Nařízením vlády č. 502/2000 Sb. ve znění posledních změn a doplňků. [3]

#### 3.5.1 Vztah mezi hlučností a výskytem ukazatelů zdravotního stavu populace

Základním smluvním akustickým parametrem pro popis hluku v životním prostředí je ekvivalentní hladina akustického tlaku A (váhový filtr A) L<sub>AeqT</sub>. V tabulkách tab. 3-1 a \* přímá expozice hluku v interiéru (L<sub>AeqT</sub>, 24h)

tab. 3-2 jsou závislosti předpokládaných zdravotních potíží na průměrné intenzitě denní a noční hlukové zátěže odstupňované po 5 dB znázorněny stínováním plochy sloupce příslušného pásma. Tyto vztahy se zejména pro expozici nočním hlukem dnes považují za dostatečně prokázané. Vycházejí z výsledků epidemiologických studií pro průměrnou populaci, ovšem s ohledem na individuální rozdíly v citlivosti vůči nepříznivým účinkům hluku je třeba předpokládat možnost těchto účinků u citlivější části populace i při nižších hladinách hluku. [3]

tab. 3-1 Prokázané nepříznivé účinky hlukové zátěže – den ( $L_{Aeq}$ , 6-22h)[3]

Nepříznivý účinek	dB (A) den						
	40÷45	45÷50	50÷55	55÷60	60÷65	65÷70	70+
Sluchové postižení *							
Zhoršené osvojení řeči a slyšení u dětí							
Ischemická choroba srdeční							
Zhoršená komunikace řečí							
Silné obtěžování							
Mírné obtěžování							

\* přímá expozice hluku v interiéru ( $L_{AeqT}$ , 24h)

tab. 3-2 Prokázané nepříznivé účinky hlukové zátěže – noc ( $L_{Aeq}$ , 22-6 h) [3]

Nepříznivý účinek	dB (A) den					
	35÷40	40÷45	45÷50	50÷55	55÷60	60+
Zhoršená nálada a výkonnost následující den						
Subjektivně vnímaná horší kvalita spánku						
Zvýšené užívání sedativ						
Obtěžování hlukem						
Zvýšená nemocnost						

Z výsledků epidemiologických studií potvrzených i u nás vyplývá těsnější vztah mezi indikátory nepříznivých zdravotních účinků hluku a hlukovou expozicí zejména pro noční hluk. Důvodem je jak homogenní expozice, neboť většina populace tráví noc doma a příliš se ve svých aktivitách neliší, tak i působení hluku prostřednictvím narušeného spánku, které se projevuje, i když nedochází přímo k probuzení.

Nárůst pravděpodobnosti zdravotního postižení hlukem z hlukové expozice v noční době pro jednotlivá 5decibelová pásma LAeq je uveden v tab. 3-3. Tabulka vyjadřuje předpokládaný celkový výskyt vybraných civilizačních onemocnění, jejichž vztah k chronické hlukové zátěži se považuje za prokázaný. V prvním sloupci tabulky je uvedeno procento osob v populaci, které je uvedenou diagnózou postiženo „bez expozice hlukem“ (tedy pro hlukové pásmo 35–40 dB), zatímco v dalších sloupcích jsou uvedena procenta postižené populace exponované dlouhodobě (více než 10 let) soustavnému nočnímu hluku (zejména potom dopravnímu). [3]

tab. 3-3 Účinky dlouhodobé expozice venkovního hluku z dopravy – noc (LAeq, 22-6 h) [3]

Nepříznivý účinek	Pásmo nočního hluku dB (A)					
	35÷40	40÷45	45÷50	50÷55	55÷60	60÷65
% osob s infarktem myokardu	do 3,7	3,7÷4,1	4,1÷4,5	4,5÷4,9	4,9÷5,4	5,4÷6,0
% osob obtěžovaných hlukem	do 26	26,0÷33,0	33,0÷41,0	41,0÷52,0	52,0÷65,0	65,0÷82,0
% osob s narušeným spánkem	do 11	11,0÷12,5	12,5÷13,8	13,8÷15,0	15,0÷16,5	16,5÷18,5
% osob užívajících denně sedativa	do 3,5	3,5÷4,0	4,0÷4,5	4,5÷5,0	5,0÷5,7	5,7÷6,5

Vztahy ke zdravotním rizikům z expozice denní hlučností jsou definovány především v naší národní legislativě (NV č. 502/2001 Sb. v platném znění) a doporučenými hodnotami WHO, které reflektují míru rozmrzelosti exponované populace. [3]

### 3.5.2 Negativní dopad hluku na zdraví člověka

Hluk je škodlivinou, se kterou se běžně setkáváme. Nadměrným dopravním hlukem je u nás zasaženo podle některých odhadů asi 40 % obytných budov a asi 2,5 milionu osob. Zahraniční studie (např. srovnávací studie Babischova z r. 1992) připouštějí vzestup rizika infarktu myokardu již u populace žijící v hladinách dopravního hluku nad 60 dB. Ising propočítal pro Německo, že při postižení 10 % bytů zvukovými hladinami nad 65 dB a při prokázaném vzestupu relativního rizika na hodnotu 1,2, je hluk zodpovědný za nejméně 2 % infarktů u německé populace. [27]

Dopravní hluk (a to zpravidla ani v okolí letišť) nepředstavuje riziko vzniku poškození sluchu. Ohrožení sluchu se však může týkat i osob bez nadměrné profesionální expozice, které ve volném čase

pěstují záliby a sporty nebo vykonávají činnosti, spojené s vystavením vysokým hladinám hluku. Ohroženou skupinou jsou zejména mladiství.

Nadměrný hluk provokuje v lidském organismu řadu reakcí. Je pravděpodobné, že snižuje obecnou odolnost vůči zátěži, zasahuje do normálních regulačních pochodů, ovlivňuje pracovní výkon, způsobuje rozmrzelost a zhoršuje komunikaci mezi lidmi. Rušení a obtěžování hlukem je častou subjektivní stížností na kvalitu životního prostředí a může představovat prvotní podnět rozvoje neurotických, psychosomatických i psychických testů u nemocných.[27]

Nejvyšší přípustné hodnoty hluku uvádí vyhláška číslo 13/1977 Sb. (viz tab. 3-4).

**Nežádoucí účinky hluku můžeme s určitým zjednodušením rozdělit na:**

- **specifické (sluchové)**, které postihují činnost sluchového analyzátoru (sem patří zejména akutní a chronické poškození sluchu z hluku a jevy maskování);
- **systémové (mimosluchové)**, ovlivňující regulační procesy a projevující se poruchami srdečně-cévního systému, metabolismu, spánku, vegetativní rovnováhy, psychické výkonnosti a pohody.

### **3.5.3 Přehled účinků hluku na lidský organismus.**

**Specifické účinky:**

- akutní akustické trauma;
- chronická porucha sluchu z hluku (dočasná, trvalá);
- maskování;
- horšení zpracování a vštěpování poznatků.

**Systémové účinky:**

- funkční porucha v aktivaci CNS způsobující:
  - vegetativní reakce;
  - hormonální odpovědi;
  - biochemické reakce;
  - poruchy spánku;
- funkční poruchy motorických a smyslově-motorických funkcí s ergonometrickými důsledky (změny zrakového pole, poruchy pohybové koordinace, úrazovost);
- funkční poruchy emocionální rovnováhy - disturbance, annoyance;
- ovlivnění kvality sociální interakce (v hluku klesá kvalita komunikace, míra empatie a stupeň altruistického chování - helping behaviour). [27], [32]

tab. 3-4 Přehled nejvyšších přípustných hodnot hluku podle vyhlášky číslo 13/1977 Sb.[32]

Položka	Druh prostředí nebo zdroje	Základní hladina	Hodnocená veličina	Rozsah korekcí	Příčina korekcí
1.	Pracovní prostředí	85	$L_{Aeq}$ za 8 hodin	0 až +40	Druh činnosti
2.	Hluk z venkovního zdroje	40	$L_{Aeq}$ pro průměrnou hodinu	-5 až +20	Způsob využití místnosti
3.	Hluk ze zdrojů uvnitř	40	$L_{Amax}$	-5 až +20	Způsob využití místnosti
4.	Hluk ve venkovním chráněném prostoru	50	$L_{Aeq}$	-10 až +20	Způsob využití území
5.	Hluk z leteckého provozu ve venkovním prostoru	60/90	$L_{Aeq}$ pro průměrnou hodinu $L_{Amax}$ Jednotlivého přeletu	-5 až +10 -10 až +5	Způsob využití území

### 3.5.4 Zdroje hluku v životním prostředí a jejich význam z hlediska vlivu na populaci

Významným nástrojem popisu zdrojů hluku a hlukové zátěže území jsou hlukové mapy. Základním impulsem pro jejich vytvoření bylo přijetí Směrnice Evropského parlamentu a Rady, týkající se hodnocení a omezování hluku v životním prostředí (Directive 2002/49/EC).

Základem této směrnice jsou 3 hlavní zásady:

- harmonizace (indikátorů, hodnocení, metod výpočtů i měření, monitorování, strategie a legislativy),
- shromažďování informací ve formě hlukových map a povinnost informovat veřejnost o současné hlukové situaci i strategii,
- financování snižování hluku investičními záměry k pasivnímu i aktivnímu snižování hlukových zátěží.

Hlukové mapy prezentují úroveň hluku (hodnoty indikátorů a jejich porovnání s limitními hodnotami), dále vyjadřují zátěž obyvatelstva (počet osob či obydlí v určité oblasti zasažených hlukem v určitém, obvykle 5tdeciblovém pásmu). Jsou orientovány především na využití při územním plánování a tvorbě strategií dalšího rozvoje zájmové oblasti. Vyžadovány budou pro aglomerace, hlavní silniční a železniční dopravní trasy a důležitá letiště. [3]

## **Hluk z hlavních antropogenních činností**

Nejvýznamnějším zdrojem hluku v životním prostředí je doprava (podrobněji viz kapitola 4), dále průmysl, zemědělství a nakonec i „zábavní průmysl“ (restaurace, bistra, veřejné produkce hudby, diskotéky, sportovní činnost apod.).

### **Hluk z dopravy**

Jak již bylo konstatováno, z hlediska zdravotního je nejvýznamnějším zdrojem hluk dopravní. Je natolik významný, že mu v této studii byla věnována samostatná kapitola 4. Doprava.

### **Hluk z průmyslu**

Významnou složkou hluku v životním prostředí je hluk z průmyslu v lokalitách, kde se setkávají pozemky s průmyslovými objekty a pozemky určené pro bydlení. Tento problém je zejména ve velkých městech Severomoravského kraje. K největším střetům dochází na území města Ostravy, případně dalších velkých měst, kde se nacházejí lokality zasažené vyššími hladinami průmyslového hluku. Řešením tohoto problému je výrazné zkvalitnění územního plánování v širších souvislostech. V posledních letech, kdy dochází k přehodnocení pohledů na územní plánování, se začínají projednávat nové dokumenty územního plánování řešící dříve opomíjené problémy hlučných lokalit. Definuje se jednoznačně využití území a tím i podmínky, za jakých je možné území využít. V rámci kraje byla v minulém období na základě stížností obyvatel a požadavků podnikatelských subjektů hluková zátěž několika lokalit spojená především s provozem širokého spektra průmyslových stacionárních zdrojů hluku.

### **Hluk ze zemědělské činnosti**

Hluk ze zemědělské činnosti je méně významnou složkou hluku v životním prostředí. Zemědělská činnost s sebou nepřináší větší plošné zátěže území Jihomoravského kraje hlukem. Zdroje lze rozdělit na sezónní a trvalé. Sezónní působení je spojeno se sklizením zemědělských produktů a jejich dopravou na místo skladování a zpracování. Lokálně tak dochází k nárůstu intenzity hluku vlivem zvýšení dopravy a zvýšenému provozu zpracovatelských zařízení (sklady, sušárny apod.). Oproti tomu trvalé stacionární zdroje místního významu (sila, mlýny apod.) trvale zatěžují nejbližší okolí hlukem. Vzhledem k mohutnosti zemědělské produkce v našem kraji proto nelze považovat vliv zemědělské činnosti na velikosti hlukové zátěže obyvatel kraje za bezvýznamný.

V posledních dvou letech sílí i v Severomoravském kraji aktivity spojené s alternativním získáváním elektrické energie – větrnými elektrárnami. Není důvod zde hodnotit estetiku nových krajinných dominant, parků větrných elektráren. Z hlediska možného ovlivnění zdraví je nutno zvažovat pouze efekt dalšího zatěžování doposud volné, pouze zemědělsky, případně dopravou hlukově zatěžované krajiny. V loňském a letošním roce bylo z titulu posouzení hlukové zátěže vesměs kladně jen našim Zdravotním ústavem zhodnoceno pro výstavbu těchto parků větrných elektráren několik lokalit.

V rámci kraje byla v minulém období na základě stížností obyvatel a požadavků podnikatelských subjektů řešena hluková zátěž několika lokalit, spojená především s provozem stacionárních zdrojů hluku jako jsou posklizňové linky, sila a mlýny. Výsledky měření dokazují v převážné části překročení limitních hodnot hlukové zátěže v blízkém okolí sledovaných zdrojů. Na základě výsledků měření musela být provedena ze strany provozovatelů celá řada opatření k eliminaci hlukové zátěže, popřípadě byla zařízení přemístěna do jiných lokalit, kde je vliv na obyvatele minimalizován.

### **Hluk z provozoven (diskotéky, restaurace, bary, hospody)**

Významným a velmi obtěžujícím zdrojem hluku je hluk z diskoték a restaurací. K eskalaci problému obtěžování hlukem došlo zejména v posledních patnácti letech s nárůstem počtu provozoven umístovaných v bezprostřední blízkosti obytného prostředí. Nejvýznamnějším, nejvíce obtěžujícím zdrojem hluku, jsou hudební produkce a hlasové projevy lidí (živá produkce, reprodukováná hudba apod.). Hluk hudební produkce obsahuje tzv. výraznou tónovou složku, která negativně ovlivňuje psychickou stránku každého, kdo se v tomto prostoru nachází, tzn. i nechtěné konzumenty hudební produkce. V této souvislosti je však potřeba konstatovat, že nejohroženější složkou populace je mládež poslouchající hudbu a navštěvující hudební produkce a diskotéky. I poslech hudby z přenosných přehrávačů je škodlivý a jeho míru rizika je možno srovnávat s velkou hlukovou intenzitou při hudební produkci na diskotékách a je o to zákeřnější, že si to posluchači „walkmana“, „discmana“ apod. ani neuvědomují. Hluk z hudebních produkcí a diskoték je také předmětem nejčastějších stížností obyvatel. Většina těchto stížností je oprávněná. Protihluková opatření ke snížení emisního hluku na zákonem stanovené limitní hodnoty v případech konání produkcí ve volném venkovním prostoru jsou nerealizovatelná, velké problémy jsou i s hudebními produkcemi konanými, ve vnitřních prostorách objektů.

Neméně významným je také hluk vzduchotechniky a chlazení, jejichž agregáty anebo jejich vyústění jsou umístovány na střechy a fasády provozoven. U těchto zdrojů hluku je jistá výhoda v tom, že jsou zde vcelku snadno realizovatelná protihluková opatření, jako např. tlumiče nebo protihlukové zástěny. [3]

Z předchozích odstavců vyplývá, že zdrojů hluku ovlivňujících lidský život je opravdu nepřeberné množství. Je tedy nutné se před těmito účinky chránit a eliminovat možné negativní dopady.

### 3.6 Teorie hluku elektrických zařízení

Před uvedením do problematiky samotné je potřeba seznámit se se základy akustiky a pochopit, vznik hluku v jednotlivých principech přístrojů.

Hluk je nežádoucí zvuk (20 Hz-20 kHz), ale může být zdrojem informace o technickém stavu stroje. Pohybující se části budí kmity povrchu zařízení a dochází k přenosu energie kmitání do okolního prostředí. Hluk se šíří všemi druhy prostředí, jedinou výjimkou je prostředí vzduchoprázdna, tedy vakuum. Akustická vlna se šíří všemi směry a tedy například ve směru  $x$  ji lze vyjádřit rovnicí.

$$y = A \sin \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) (\text{m}^3 \text{s}^{-1}) \quad (\text{r. 3-4}) [28]$$

Akustická rychlost

$$v = A \omega \cos \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) (\text{dB}) \quad (\text{r. 3-5}) [28]$$

Akustická emise může být spojitá nebo impulsní.

Hluk elektrických strojů a jeho snižování či odstraňování jsou do jisté míry obtížné problémy. Je to jak problém fyziologický tak i technický. Technický proto, že hluk je způsobován chvějícími se částmi stroje a chvěním jsou tyto části namáhány nebo i degradovány. Obecnější pojem je zvuk, kterým označujeme změny tlaku prostředí, které je rozeznatelné lidským uchem. Počet změn za jednotku času je kmitočet zvuku.

Tedy jakékoliv mechanické kmitání a vlny pružného prostředí, bez ohledu na jeho skupenství, označujeme jako zvuk, leží-li kmitočet ve slyšitelné oblasti člověka, tj. mezi 16 Hz (hluboký tón) a 20 kHz (vysoký tón). Při kmitání strojů se zvuk buď přímo vyzařuje do okolí přes vzduch, nebo se přes pevné části šíří do míst, kde jsou větší plochy schopné kmitání (kryty apod.). Kmitání může být periodické, neperiodické nebo náhodné.

Mechanické kmity, které nejsou vnímány člověkem, se nazývají:

Infrazvuk..... $f < 16 \text{ Hz}$       ultrazvuk .... $f > 20 \text{ kHz}$

$\lambda > \approx 20 \text{ m}$

$\lambda < \approx 2 \text{ cm}$

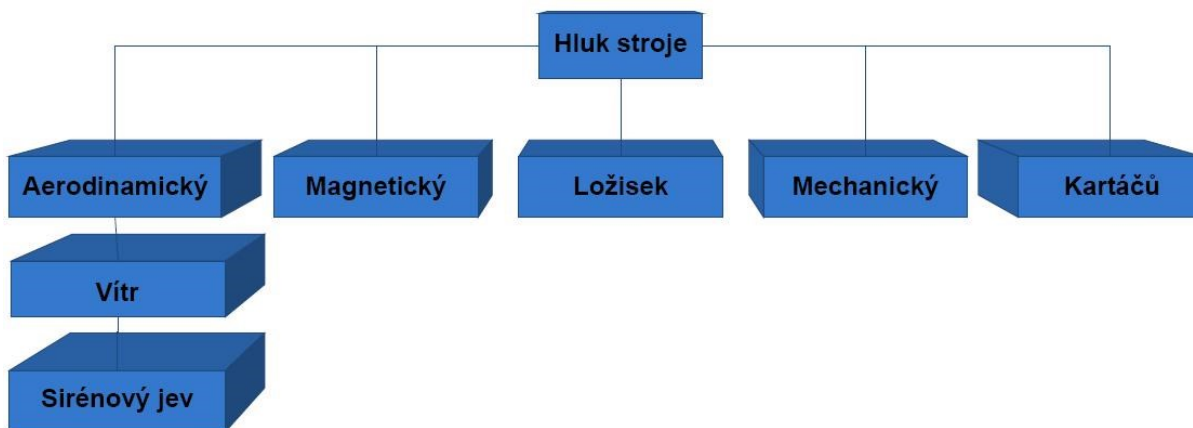
Jako míra zvuku se užívá akustický tlak nebo intenzita zvuku. Obou těchto veličin nemůže být použito jako míry pro sluchový vjem, protože mezi nimi a sluchovým vjemem neexistuje žádný vztah. Hladina zvuku se proto měří v dB. Toto měření je oproštěno od závislosti sluchového vjemu na kmitočtu a respektuje logaritmickou citlivost ucha. Decibelová skupina souhlasí s tónovou stupnicí pro 1000 Hz, neboť je na ni vztažena.

Víme, že jsou předepsány hladiny hluku z hygienických hledisek (kanceláře  $45 \div 50 \text{ dB}$ , strojovny i  $90 \text{ dB}$ , atd.).



Protože elektrické stroje jsou značnými zdroji hluku, je nutno se tímto problémem zabývat již při návrhu stroje.

Na celkovém hluku elektrického stroje se podílejí tyto složky:



obr. 3-9 Rozdělení hluku elektrických zařízení podle vzniku [28]

### 3.6.1 Magnetický hluk

Magnetický hluk je způsoben magnetickými silami, které pulsují běžně s kmitočtem 100 Hz. Dále je tento hluk způsoben drážkováním, harmonickými vyšších řádů v magnetickém poli, nestejnoměrností vzduchové mezery apod. U transformátorů to je v podstatě jediný zdroj hluku. Hluk je u nich vyvozován chvěním jader a spojek při přemagnetovávání. Kmity se přenášejí jednak vzduchem nebo olejem do okolního vzduchu a dále nádobou s rámem na základ či podlahu do země. Hluk transformátoru lze zmenšit zmenšením indukce, což však by chtělo její podstatné zmenšení, neboť zmenšení hluku o 10 dB by se dosáhlo zmenšením indukce o 50 %. Musel by být tedy dvojnásobný průřez jádra. Proto se jde raději cestou důkladného stažení magnetického obvodu, vyztužení plechů i vinutí, užití zvukové izolace apod.

Pokud budeme uvažovat točivý elektrický stroj s vinutími na statoru i rotoru, které jsou protékány proudy, s proměnnou indukcí v prostoru vzduchové mezery, prostorová změna magnetické indukce ve vzduchové mezeře vyvolá mezi statorem a rotorem časově proměnné síly, které za určitých podmínek mohou rozechvět některé části stroje a způsobit hluk. Příčinami této formy hluku jsou tedy elektromagnetické síly způsobené interferencí 1. harmonickou magnetické indukce ve vzduchové mezeře a harmonickými vyšších řádů. To je důsledek změny vodivosti vzduchové mezery po obvodu. Vedle vlivu vinutí se uplatní drážkování, otevření drážek a excentricita rotoru i neokrouhlost statoru. Stator je vybuzen k periodickým kmitům a tak je zdrojem hluku.

K podstatnému zvýšení hluku stroje dochází při rozběhu. Je to způsobeno velkým rozběhovým proudem, čímž se zesílí účinky harmonických vyšších řádů magnetomotorického napětí. Dále při změně otáček a tedy i skluzu, se mění plynule kmitočty budících sil, což může přispívat ke vzniku rezonancí.

Podstatné zvýšení hluku se pak projevuje u motorů napájených nesinusovým napětím a proudem. Je to neharmonické napájení, kde se objevuje značné množství časových harmonických.

Zvlášť závažný je hluk u transformátorů, orientovaných plechů, protože zde jsou vyšší indukce. Také zvýšení napětí sítě má značný vliv. Tak např. při zvýšení napětí o 10 % vzroste hluk o 3 dB. [28]

### 3.6.2 Aerodynamický hluk

Aerodynamický hluk má původ v turbulenci chladiva, vyvolané ventilátorem a rotorem. Víry odtrhující se od rotujících povrchů způsobují hluk a to hluk širokopásmový. Prakticky jej nelze potlačit, ale dá se udržet v přijatelných mezích např. vhodným tvarem lopatek ventilátoru, tvarem pólů, vzduchovými clonami apod. Úroveň hluku je dána dopravovaným množstvím chladiva a zvláště obvodovou rychlostí rotujících těles.

Sirénové efekty vznikají tím, že stlačený vzduch ofukuje stojící překážky a ty se stávají zdrojem akustického záření vysílající podélné vlnění.

### 3.6.3 Hluk způsobený ložisky

Hluk způsobený ložisky je nepatrný u strojů s kluznými ložisky. Hluk způsobený ložisky je podstatnější u strojů s valivými ložisky. Zde je to otázka stavu ložiska, stavem mazání i nevyvážeností rotoru.

### 3.6.4 Mechanický hluk

Tento hluk je způsobován především chvěním částí stroje a kmitáním větších ploch stroje (vzduchovody) a také, nevyvážením rotujících částí stroje. Nevyvážený rotor či chvění stroje mohou vyvolat kmitání základu, vzduchovodů, krytů a tím i další hluk. U stejnosměrných strojů bývá výrazný i hluk kartáčů. [28]

### 3.6.5 Hluk transformátorů

Hluk těchto strojů je nepříjemný také proto, že distribuční transformátory jsou často umístovány v blízkosti obytných budov nebo i přímo do nich. Zvukové vlny také zrychlují degradaci izolačního systému a transformátorového oleje.

Hluk je u transformátorů způsoben elektromagnetickými příčinami a u velkých také ventilací. Hlavním zdrojem hluku je magnetostricke magnetického obvodu a ostatních kovových částí.

Magnetostricke způsobuje tvarovou změnu feromagnetického tělesa při jeho magnetování. Pokud nepřekročíme koleno magnetizační charakteristiky, vzniká pouze lineární magnetostricke. Má dvě složky a to konstantní, která způsobuje trvalou dilataci a sinusovou, která má dvojnásobek frekvence sítě, a proto je výrazný hluk o frekvenci 100 Hz. Magnetostricke tedy podélné kmitání jader i spojek, se přenáší i do nádoby, která hlučí. [29]

#### **Transformátory podle hluku dělíme do 3 kategorií:**

podle výkonu (což zhruba odpovídá ČSN 35 1100):

- do 300 kV·A - normální hlučnost 55 dB,
- do 1000 kV·A - normální hlučnost 69 dB,
- přes 1000 kV·A - normální hlučnost 60 dB.

Třetí kategorie jsou průmyslové a venkovní transformátory. Hlučnost je podstatná u transformátorů umístěných v obytné zástavbě.

Velikost hladiny hluku je podstatná zvláště u elektrických strojů určených pro pohon spotřebičů v domácnostech, kancelářích, nemocnicích apod. Zde normy předepisují možné zvýšení hluku nad okolní hladinu. V průmyslových podnicích bývá hluk v motorovnách, kde pracují i desítky velkých strojů (hodnoty přesahují i 100 dB). Dnes se hlučnost hodnotí podle tzv. čísla hluku N. Určuje se z nomogramu, do něhož se zakreslí zjištěné oktanové spektrum celkového akustického tlaku a hlučnosti stroje se přiřadí nejvyšší číslo třídy hluku N, k jehož křivce zjištěné spektrum dosahuje. [28]

### 3.7 Způsoby eliminace hluku

Měření hluku není jednoduchá záležitost. Malé stroje lze sice měřit ve speciálních komorách, ale velké stroje je nutno měřit na zkušebně či v provozu. Obvykle se měří 1 m od stroje.

V technické praxi rozeznáváme dva základní způsoby snižování hluku strojních zařízení:

- primární způsob, tj. snižování hluku přímo v jeho zdroji ve stroji samotném, -
- sekundární způsob, tj. pohlcování již vyzářené akustické energie a její přeměna v jiný druh energie,

První způsob je pochopitelně efektivnější, řeší samotnou podstatu problému. Při jeho aplikování nutno zvažovat, z jakých dílčích složek se skládá celkový hluk strojního zařízení a snížení které z těchto složek bude představovat výrazné snížení jeho celkového hluku. V případě elektrického točivého stroje jsou, jak již bylo dříve uvedeno, tyto dílčí složky hluku: hluk elektromagnetického, mechanického a ventilačního původu. [42] Hluk stroje můžeme snížit řádným upevněním všech částí, různými nátěry, protihlukovými kryty atd. [28]

#### **Způsoby eliminace můžeme rozdělit na tři základní systémy:**

- 1) Konstrukční
- 2) Pasivní systémy
- 3) Aktivní systémy

Ad1) Konstrukční: toto jsou systémy jdoucí k samotné podstatě vzniku parazitních zvuků u jednotlivých elektrických zařízení. Zásahy pro samotnou eliminaci se tedy týkají konstrukčních a vývojových skupin, a také projektantů. U transformátorů jde tedy především o použití materiálů plechů pro elektrotechniku, jejich následné lisování a svazování, které může potlačit magnetostrukční hlukové účinky. U rotačních strojů jsou to návrhy ventilátorů bez sirénových a aero efektů, konstrukce nových ložisek a také lepší technologické postupy, zajišťující vyváženost rotačních částí a bezhlučnost mechanických systémů. Pokud opomineme konstrukční zásahy do elektrických zařízení a potřebujeme řešit hlučnost stávajících zařízení, lze přistoupit k problematice zbývajících dvěma způsoby a to aktivním a pasivním řešením.

Ad2) Pasivními řešeními jsou kryty, pryžové silentbloky a eliminace pomocí konstrukce budovy – příčky, atd. Hluk stroje můžeme snížit řádným upevněním všech částí, různými nátěry, protihlukovými kryty. Tak např. u rotačních strojů se sníží hlučnost tím, že se kromě upraveného ventilačního uzlu použijí magnetické klíny v otevřených drážkách.

Ad3) Aktivní systémy, aktivní tlumení hluku – ANR / ANC (Active Noise Reduction, Active Noise Cancellation Reduction) kromě již zmiňované pasivní izolace hluku i aktivně analogově potlačují hluk vytvářením protifáze v omezeném prostoru úzkého pásma. Mikrofon umístěný v sluchátku vytváří protifázi, tzn. tato technologie potlačuje hluk a hlukové špičky vždy jen o nějakou hodnotu. Jsou to tedy zařízení schopné eliminovat hluk na základě zpracování signálu hlukových emisí samotných. Využívají elektrotechnických analogových i digitálních prvků a jsou tak schopna například pomocí protifáze eliminovat hlukové emise. [7]

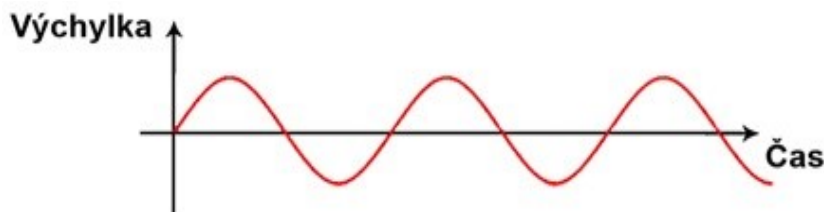
### 3.8 Protifáze

Pro pochopení systému je důležité znát základ, tedy vlnění samotné.

Fáze vlny je bezrozměrná veličina, která určuje vztah veličiny vlny, (například výchylky akustického tlaku) k danému místu a času a ke stavu charakteristické veličiny vlny v časovém a prostorovém počátku. Závislost charakteristické veličiny určuje tvar „vlny“ bez ohledu na její šíření. Fáze je parametrem, na kterém závisí časový průběh charakteristické veličiny v pevně daném místě, kterým vlna prochází, resp. prostorové pole charakteristické veličiny pro pevný časový okamžik. O fázi se hovoří nejen v případě vlnění ale i při kmitání, kde má tato veličina podobný význam, ale bez prostorové závislosti. Akustická protifáze je tedy stav vlny, která je ať už uměle nebo přirozeně otočená, nebo posunutá o  $180^\circ$ . Přirozeně se protifáze vytváří například v určitém místě za reproduktorem, který kmitá bez ozvučnice. Reprodukter totiž svým kmitavým pohybem vytváří jak fázi, která je před reproduktorem, tak protifázi, která je za reproduktorem. Pokud se setkají akustické signály, které na sebe vzájemně působí a jsou vzájemně otočeny o  $180^\circ$ , dochází k akustickému zkratu a tedy k odečtení, vyrušení těchto dvou střetnutých signálů. Tento princip eliminace hluku se začal využívat v leteckém průmyslu.

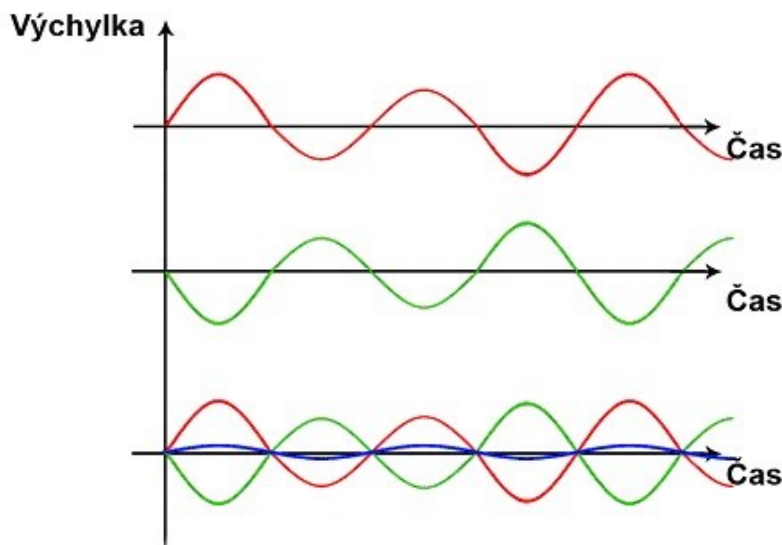
Tuto analogovou a ve své době revoluční technologii, adaptoval pro letectví Dr. Amar Bose, zakladatel Bose Corporation, dnes již hodně známé značky nejenom leteckých sluchátek. Obecnou nevýhodou je poměrně malé spektrum potlačovaných frekvencí a nemožnost potlačit nepříjemný šum. Navíc je nutný napájecí zdroj, tzn. baterie nebo napájení ze sítě. [4]

Zvuk můžeme tedy zachytit křivkou znázorňující výchylku v čase.



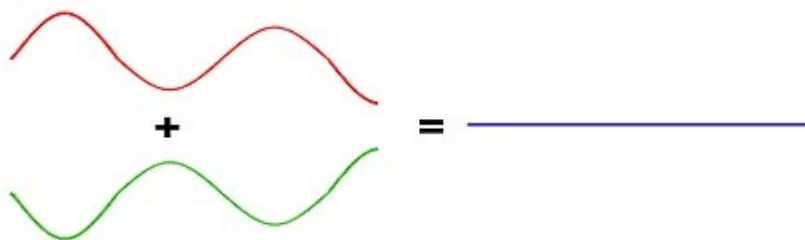
obr. 3-10 Sinusový průběh akustického signálu

Protifáze je tedy otočení stávajícího signálu o  $180^\circ$ .



obr. 3-11 Otočení signálu

Výsledkem působení přesné protifáze je akustický zkrat, což je v ideálním případě absolutní odečtení obou signálů a tedy jejich úplná eliminace.



obr. 3-12 Znázornění působení protifáze

V nahrávací praxi je tento stav defektní a na protifázi je pohlíženo jako na nechtěný efekt, který je schopen úplně zrušit některé signálové skupiny či prvky. Například působením protifáze je možno vymazat z hudební nahrávky konkrétní nástroje.

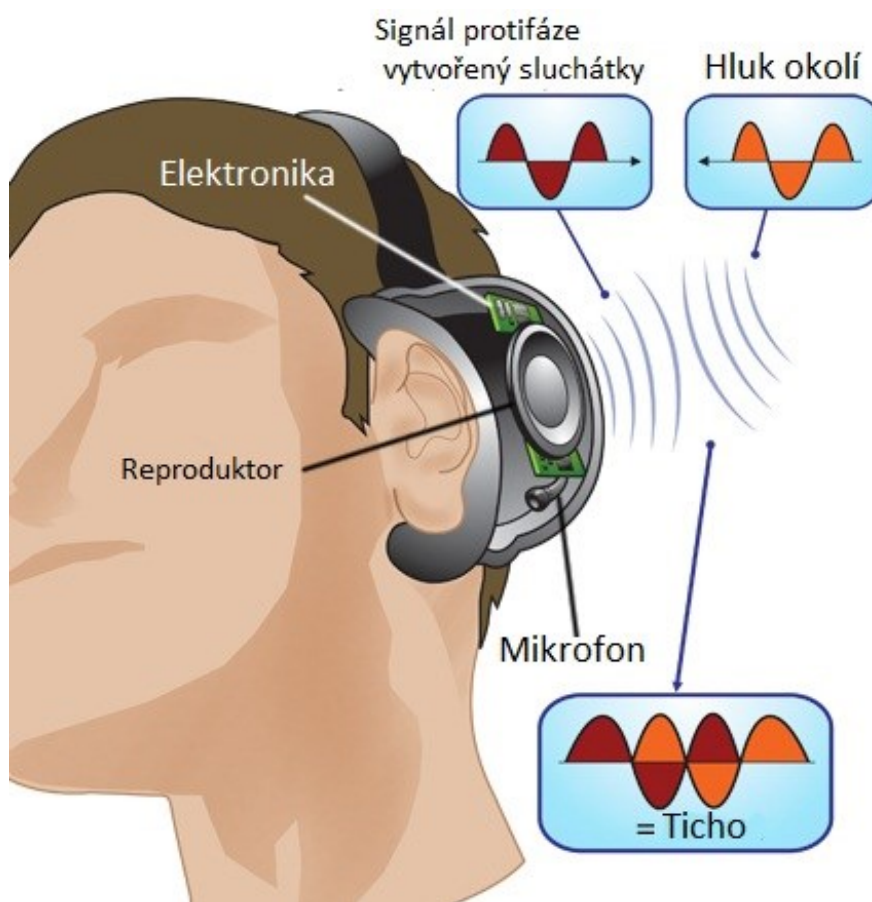
V ozvučovací praxi je tato situace využívána při nasměrování zvukového signálu pouze jedním směrem. Například při koncertním vystoupení jsou takto odstíněni samotní hudebníci od obrovského akustického výkonu současných ozvučovacích systémů.

V našem případě je na protifázi pohlíženo jako na možnost eliminace parazitních zvuků elektrických zařízení a tedy jako na stav chtěný.

Současné využití systémů využívajících principů protifáze:

protifáze se již dlouhá léta využívá ve studiové praxi, většina současných mixážních studiových pultů tuto funkci obsahuje. Pro eliminaci hluku je ale protifáze využívána jen v několika málo posledních letech a jen v několika málo aplikacích.

Mušlové chrániče sluchu využívají tento systém. Tyto chrániče se používají v místech, kde je extrémně vysoká expozitura akustickým tlakem a hlavně, kde působící signál obsahuje frekvence, jenž běžné chrániče velmi špatně eliminují. Takovéto chrániče obsahují reproduktor, který je ale natočen tak, aby působil ven z mušlového krytu. Je tedy otočen oproti standardním hudebním sluchátkům o  $180^\circ$ . Dále obsahují mikrofon přijímající akustický signál, působící v místě expozitury. Mikrofon tento signál, působící na chránič, přijme, elektronika obsažená v tomto chrániči otočí působící signál o  $180^\circ$  a zesílený jej vyšle do reproduktoru. Výsledkem samozřejmě není absolutní ticho v prostoru chrániče, ale podařilo se eliminovat nežádoucí akustický tlak až o desítky dB. Tento systém je také využívám v hudebních sluchátkách pro eliminaci okolního hluku a tedy pro lepší možnost poslechu. Princip je obdobný jako u chráničů sluchu. Systém si je možno prohlédnout (viz *obr. 3-13*). [24]



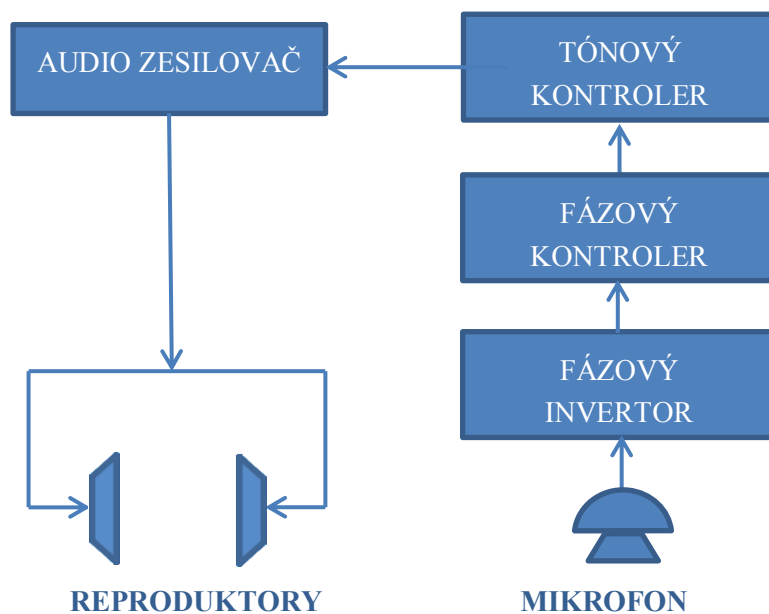
*obr. 3-13 Schéma systému sluchátek využívajících protifázové eliminace hluku [43]*

Dalším důležitým využitím principu eliminace hluku pomocí protifáze je odhlučnění kokpitů raketoplánů a letadel. S dobrými výsledky se využívá tam, kde se frekvence hluku příliš nemění a nejsou tedy kladeny velké nároky na vzorkovací elektroniku, která musí analyzovat přicházející signál a obracet jej přesně do protifáze. Monotónní zvuk motorů v kokpitu letadla za letu je poté snadněji elektronicky analyzován a následně protifázově eliminován, než hluk s měnící se frekvenční charakteristikou.



### 3.9 Systém eliminace hluku pomocí protifáze

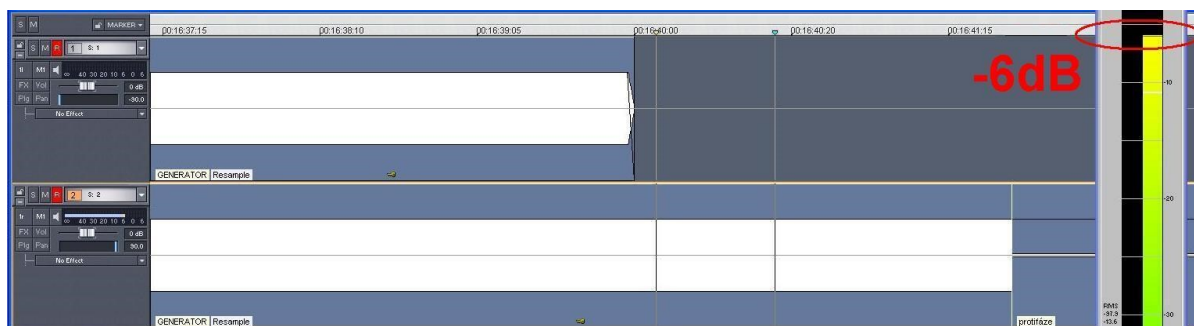
Systém tvoří měřicí mikrofón, který svým velmi kvalitním elektro-akustickým měničem přijímá hlukový signál a mění jej na sinusovou křivku napětí, ta je přijata systémem, který signál invertuje. Invertovaný signál je otočen přesně o půlperiodu, tato část je nejdůležitější, a také musí být provedena s velkou přesností, jakékoliv posunutí fází znamená nefunkčnost zařízení a může znamenat i zesílení původního hlukového signálu. Tento obrácený a přesně posunutý signál je zesílen zesilovačem a vyzářen proti signálu hluku.



Obr. 3-14 Blokové schéma systému eliminace hluku pomocí protifáze

## 4 Návrh a realizace protifázového eliminátoru

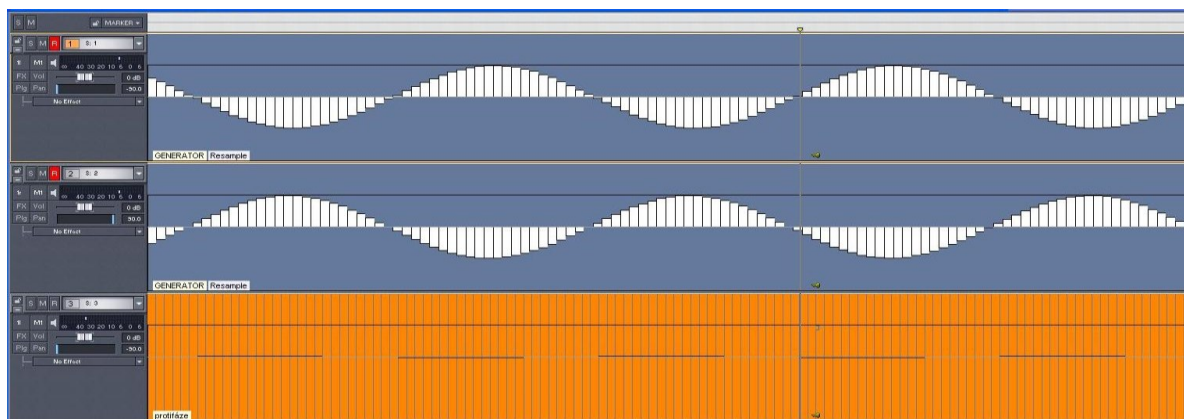
Na úplném počátku musela být ověřena veškerá teoretická tvrzení a byly tedy vytvořeny simulace, které dokonale imitovaly hlukové prostředí a působení případné protifázové eliminace. Simulace působení protifáze proběhly v softwarovém prostředí Sequoia. Celý test spočíval ve vytvoření dvou monofonních stop, do kterých byly nejprve importovány zvukové signály o frekvenci 1kHz. Tato frekvence je všeobecně uznávána jako referenční kmitočet, ke kterému jsou vztažena mnohá akustická měření. Byly voleny záměrně dvě stopy, aby bylo možno provést následné posunutí fází o půl-periodu. Bylo nutné zvolit intenzitu signálu, od které se následující měření bude odečítat, protože je dB poměrná jednotka a signál byl měřen standardním hudebním VU metrem, byla zvolena výchozí hladina -6dB (viz obr. 4-1). Signál byl importován do stop jako data, bylo tedy vyloučeno jakékoliv elektronické narušení signálu, také veškeré následující operace probíhaly pouze jako softwarový krok, signál nemohl být zkreslen elektronickými prvky ani vnějším rušením.



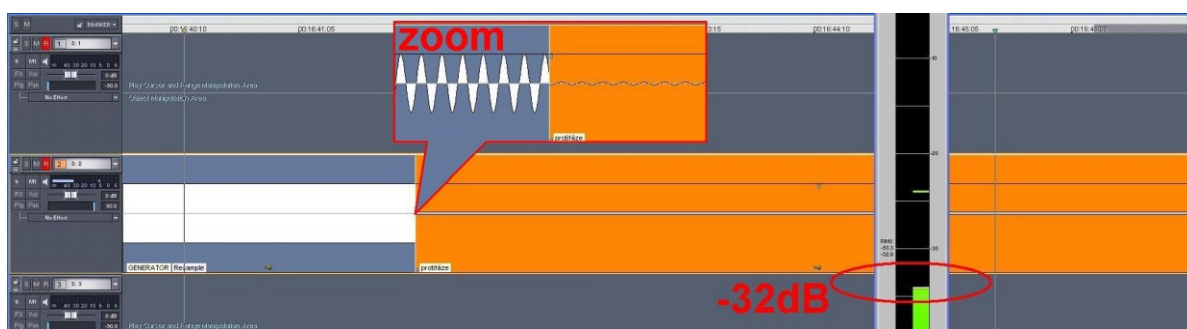
obr. 4-1 Dvě monofonní stopy obsahující zvolený signál a VU metr ustálený na hladině -6dB

Tento signál byl zvětšen tak, že čtyřicet period signálu tvořilo tisícinu sekundy. Při tomto zvětšení je možné provést precizní posunutí signálu o půlperiodu a tím dosažení absolutní protifáze. Prvotní testy byly ale záměrně prováděny jen s částečným posunutím. První test tedy probíhal s posunutím o čtvrt-periodu, tento stav v tomto umělém prostředí zapříčinil pokles o další 3dB, tedy na -9dB. V běžné praxi by byl tento stav nechtěný, protože by neměl nejen žádný účinek, ale reproduktor by produkoval ten samý nepříznivý hluk. Zajímavé začalo být sčítání posunutých signálů skutečně až od chvíle téměř dokonalé protifáze. Například nepřesnost v posunutí reprezentující pět sto-tisícin sekundy mělo již za následek pokles na -32dB, tedy snížení o 26dB. Tento výsledek je již velmi uspokojivý a je patrný z obr. 4-2 a při zvětšení na obr. 4-3 kde je také zobrazena část VU metru se změřenou hladinou signálu po odečtení.



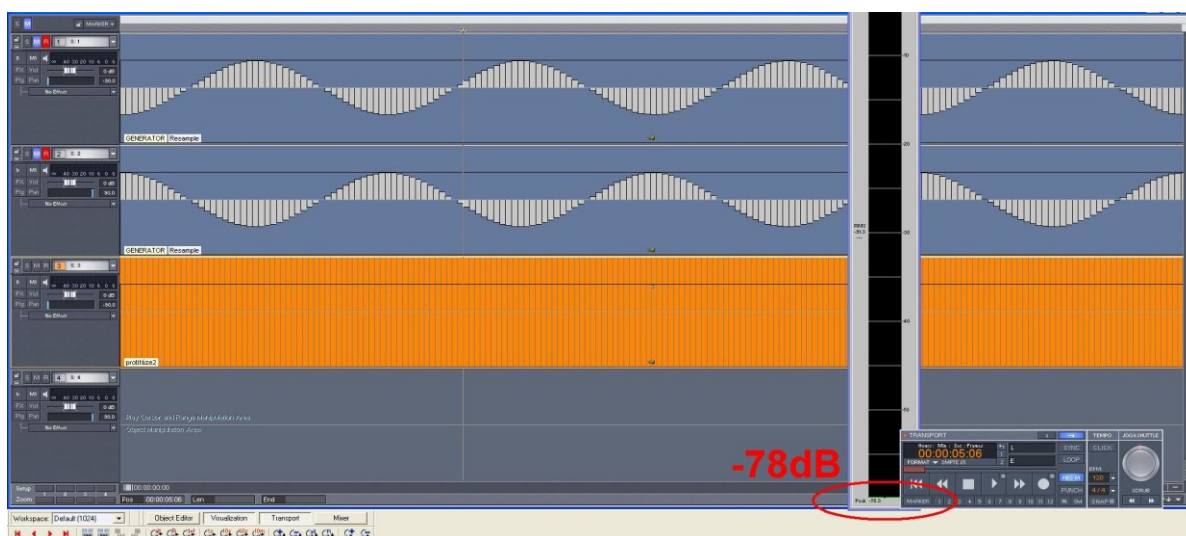


obr. 4-2 Posunutí otočeného signálu o pět-tisícin sekundy a následné odečtení.



obr. 4-3 Zoom odečteného signálu

Závěrečným a nejdůležitějším testem bylo úplné otočení signálu a tedy absolutní protifáze. V oranžovém poli je vidět, že i při velikém zvětšení není v oranžovém poli patrný žádný signál. Oranžové pole vždy reprezentuje výsledný signál po sečtení posunutých signálů. Dokladem absolutní protifáze je také VU (Volume Unit) metr, který se ustálil na hodnotě -78dB, snížení o 72dB. Toto vše je patrné z obr. 4-4. Těmito testy byla tedy potvrzena eliminační schopnost protifázového signálu.



obr. 4-4 Absolutní odečtení dvou totožných signálů otočených do protifáze.

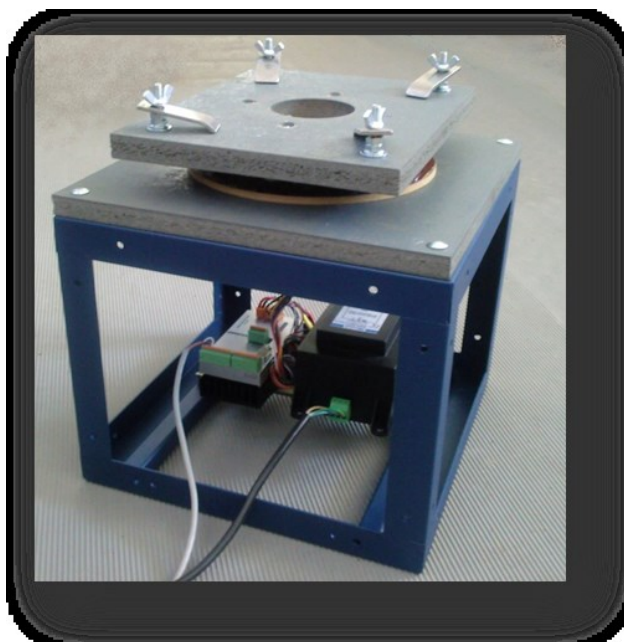
## 4.1 Vývoj a realizace měřicího pracoviště pro analýzu elektroakustických měničů.

Celý systém eliminace hluku pomocí protifáze je velice náročný na přesnost jednotlivých prvků zpracovávajících parazitní hluk. Jakákoliv odchylka ve zpracování může být naopak příčinou zesílení parazitního hluku. První fází reálných testů tedy bylo měření a výběr akustických měničů, kterými jsou mikrofony a reproduktory. Mikrofony zajišťují prvotní příjem akustického signálu a jeho zpracování na ekvivalentní elektrický signál. Je tedy jasné, že již tento prvek může celý systém vytvořit nefunkčním.

Standardní měřicí mikrofony, nabízené trhem, mají kruhovou charakteristiku. To znamená, že přijímají signál ze všech stran. Pro účely protifáze je tato charakteristika nevhodná, protože přijímá stejně dobře přímý signál zdroje, jako například signál již třikrát odražený a zdeformovaný kovovou konstrukcí transformátoru nebo stěnami trafostanice samotné.

Snahou je získání co nejčistějšího hlukového signálu již v prvotní fázi jeho přeměny na dále zpracováváný elektrický signál. Mikrofonem vhodným pro měření parazitního hluku je tedy mikrofón s úzce směrovou charakteristikou, který má největší citlivost v přímém směru a s přibývajícím stupněm odklonu od zdroje hluku jeho citlivost razantně klesá. Pro výběr nejvhodnějšího mikrofónu byla provedena řada měření ve výzkumné experimentální hlukové laboratoři Vysoké školy báňské – TUO. Tato laboratoř obsahuje bezdovukovou komoru, která je pro měření nezbytná. Akusticky bezdovuková komora je místnost, která se vyznačuje téměř nulovou akustickou odrazivostí stěn a dále je tato místnost velmi dobře odhlučněná před působením okolního hluku.

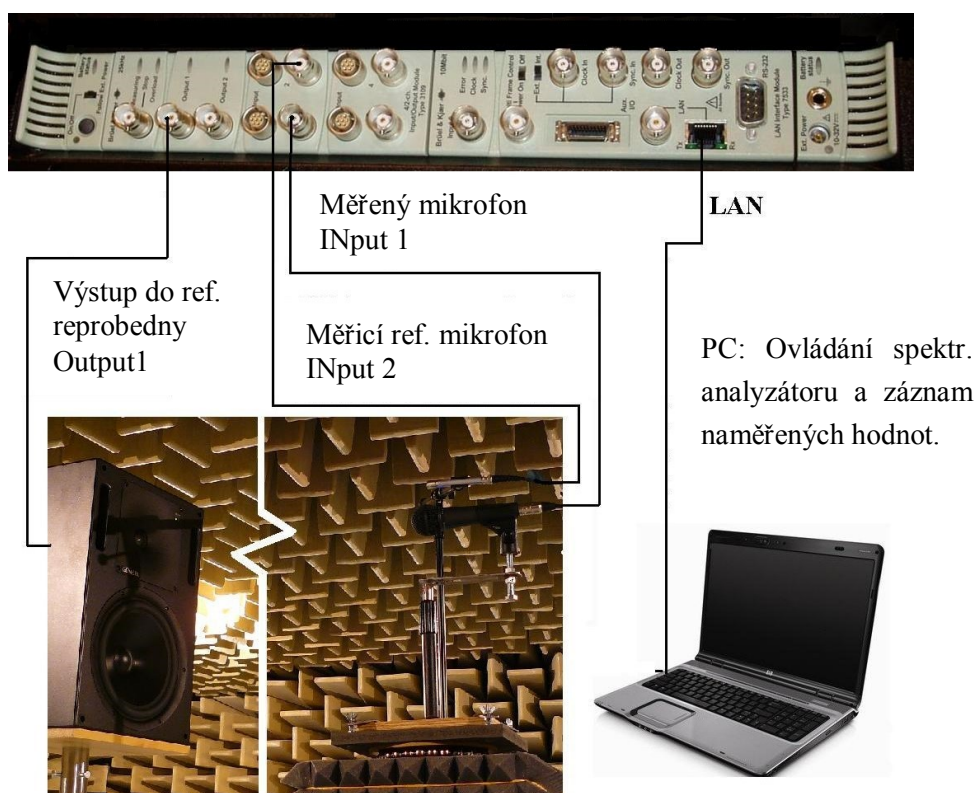
Pro všechna měření, která již byla provedena a také která budou dále následovat, bylo vyvinuto polohovací zařízení, které automaticky mění polohu buď akustického zdroje, nebo akustického měniče navzájem vůči sobě, (viz obr. 4-5).



obr. 4-5 Realizované polohovací zařízení pro měření směrových charakteristik

Toto polohovací zařízení bylo vybaveno krokovým motorkem a elektronikou, která umožňuje dálkové ovládání a řízení pomocí počítače. Obsluha je tak schopna vně bezdovukové měřicí komory nastavovat polohu akustického zdroje vůči měniči a dále také velikost kroku motoru, návrat nebo posun motoru. Zařízení může být využíváno k měření směrových charakteristik i po dokončení tohoto disertačního výzkumu.

Byla změřena řada mikrofonů s různými směrovými charakteristikami. Jako nejvhodnější pro aplikaci v systému eliminace byl zvolen mikrofon s úzce směrovou charakteristikou Sennheiser MKH 416-P48U3 uveden na obr. 4-7. Měření směrových a frekvenčních charakteristik zajišťoval spektrální analyzátor.

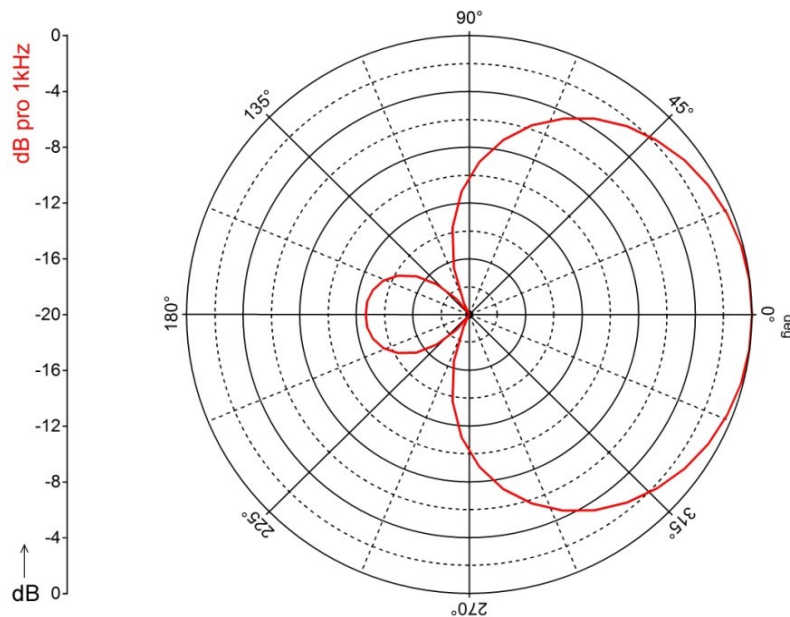


obr. 4-6 Schéma zapojení měření pomocí spektrálního analyzátoru Brüel&Kjaer

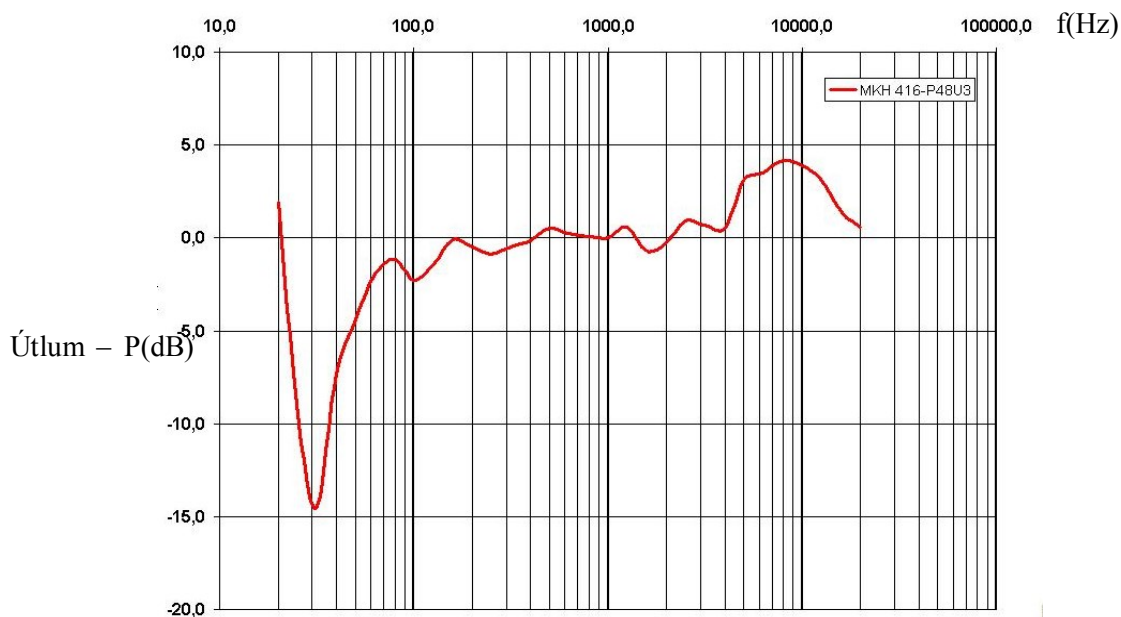
Systémem znázorněným na obr. 4-6, byla provedena řada měření ověřujících šíření akustického signálu a následná vhodnost jednotlivých prvků, ze kterých se bude skládat Protifázový eliminátor hluku. Grafy frekvenčních a směrových charakteristik byly vytvořeny v programu FlexPro (viz obr. 4-8 a obr. 4-9).



obr. 4-7 Úzce směrový mikrofon sennheiser MKH 416 [11]



obr. 4-8 Směrová charakteristika mikrofonu Sennheiser MKH 416-P48U3 pro frekvenci 1kHz



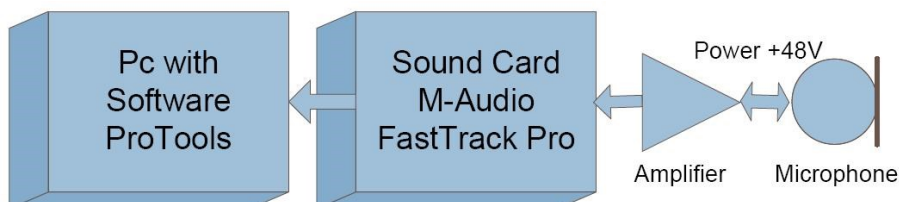
obr. 4-9 Frekvenční charakteristika mikrofonu Sennheiser MKH 416-P48U3

Dále byla změřena řada reproduktorů, ale ty se svou směrovou charakteristikou nějak výrazně neliší a jejich frekvenční rozsah je dán výrobcem. Z těchto výsledků bylo vyhodnoceno, že konkrétní reproduktor bude volen až podle skutečné aplikace. V této fázi nebylo zřejmé, jak široké frekvenční spektrum bude pro eliminátor potřebné a tedy nemohl být volen konkrétní reproduktor. Na základě tohoto zjištění bylo nutné provést hlukovou analýzu eliminovaného zařízení, tedy transformátoru.



## 4.2 Analýza parazitního hluku výkonových transformátorů.

Měření proběhlo na čtyřech transformátorech nainstalovaných na VŠB – Technické univerzitě Ostrava. Jsou to jádrové 3fázové transformátory starší konstrukce. Tyto transformátory nejsou tedy vybaveny aktivním chlazením – ventilátory, které by se podílely na tvorbě hluku. Jak je vidět na obr. 4-11, kryt transformátoru je otevřen a mikrofon, jenž snímá hluk, je přiblížen na nejbližší možnou vzdálenost tak, aby byly vyliminovány vlivy okolí. Právě z tohoto důvodu je použit úzce směrový mikrofon. Signál sejmutý tímto kvalitním mikrofonom je dále vyslán do profesionální zvukové karty M-Audio FastTrack Pro, která představuje A/D a D/A převodník. Ta signál pořízený mikrofonom digitalizuje a přes USB rozhraní je tento signál poslán do počítače. Počítač funguje během měření pouze jako digitální záznamové zařízení. Samotné záznamy jsou uloženy ve formátu wav o vzorkovací frekvenci 48kHz a rozlišení 24 bits. Takto je zaručena nejvyšší možná kvalita záznamu a tím také kvalita pozdějších výsledků pořízených zpracováním tohoto signálu. Na obr. 4-10 je naznačeno jednoduché blokové schéma záznamového měřicího zařízení, které je zdrojem analyzovaných signálů.



obr. 4-10 Blokové schéma záznamového zařízení pro spektrální analýzu



obr. 4-11 Měření hlukových emisí transformátoru

Pro měření byly vybrány tři transformátory a jedna rozvodná stanice s transformátorem, u kterých byly dlouhodobě měřeny intenzity hluku v závislosti na zatížení. Proto jsou také výsledky pořízeny jak ve stavu naprázdno, tak v zatíženém stavu.

Následné analýzy připadají transformátoru označenému jako T615/1, jeho parametry jsou viditelné na obr. 4-12 (reálný štítek měřeného transformátoru).



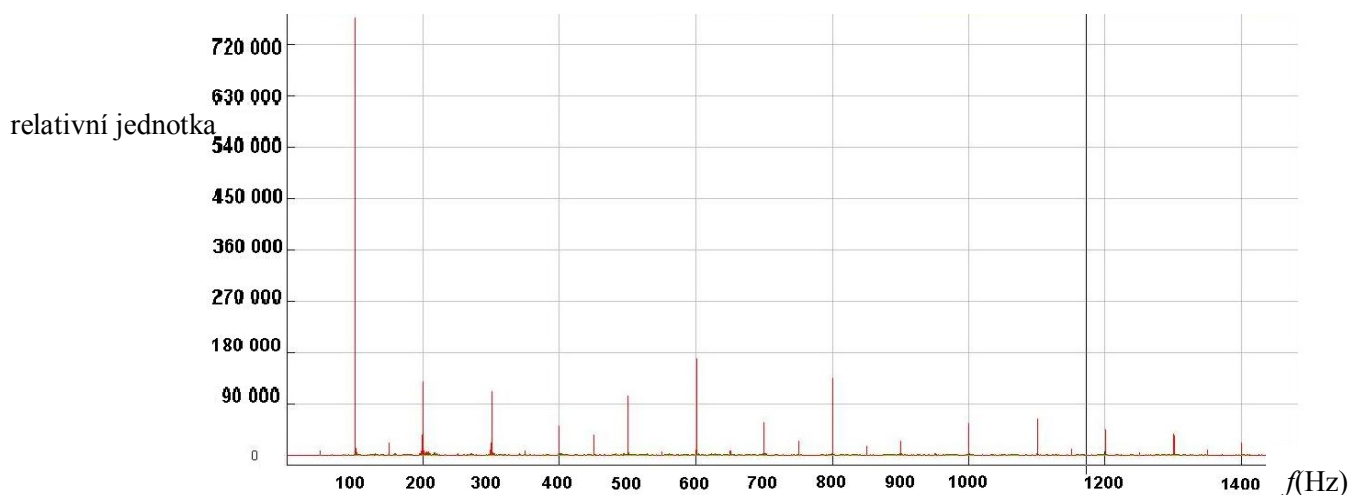
obr. 4-12 Přístrojový štítek transformátoru T615

V prvním případě byl transformátor zatížen na 7% svého jmenovitého výkonu, jednotlivými fázemi tedy protékal proud o hodnotě 70A. Při tomto odběru můžeme říci, že byl transformátor ve stavu naprázdno. Naměřený hluk dosahoval hodnoty 74,7dB při zavřeném krytu a 75,65db při otevřeném krytu.

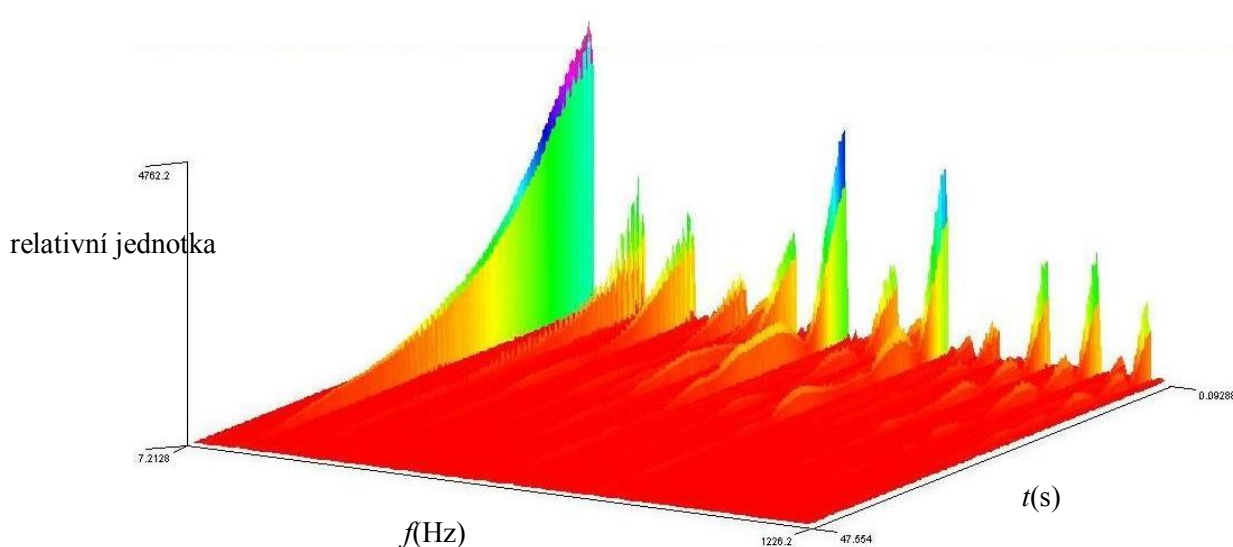
V druhém případě byl transformátor zatížen 480A na fázi, tedy 48% zatížení z celkového výkonu. Naměřený hluk dosahoval velmi podobných hodnot jako u stavu naprázdno, 76,8dB při zavřeném krytu a 78,3dB při otevřeném krytu.

#### 4.2.1 Spektrální analýza transformátoru T615 ve stavu naprázdno

obr. 4-13 ukazuje FFT analýzu zachyceného hlukového signálu transformátoru T615 v rozsahu (0÷1500)Hz. Transformátor pracuje ve stavu naprázdno a díky velkému sycení magnetického obvodu se dle předpokladu výrazně projevuje frekvence 100Hz způsobující elektromagnetický hluk a která zároveň odpovídá dvojnásobku 1. harmonické budicího proudu  $f=50\text{Hz}$ . Díky deformaci průběhu budicího proudu vlivem sycení a tvarem magnetického obvodu transformátoru (jádrový se 3mi sloupy, viz obr. 4-11) se projevují i vyšší harmonické v buzení. Jejich obrazem jsou pak naměřené průběhy harmonických vyšších řádů ve zvukové stopě a prakticky odpovídají frekvencím 200, 300, 400, 500, 600 a 800Hz toto je patrné z grafu na obr. 4-13. Magnetický tok se uzavírá vzduchem a krytem transformátoru a dalšími konstrukčními částmi a způsobuje jejich chvění projevující se přidavným hlukem. Ze spektrogramu na obr. 4-14 je patrné, že je transformátor ve stavu naprázdno značně frekvenčně nestabilní.



obr. 4-13 Spektrální analýza transformátoru T615 při chodu naprázdno

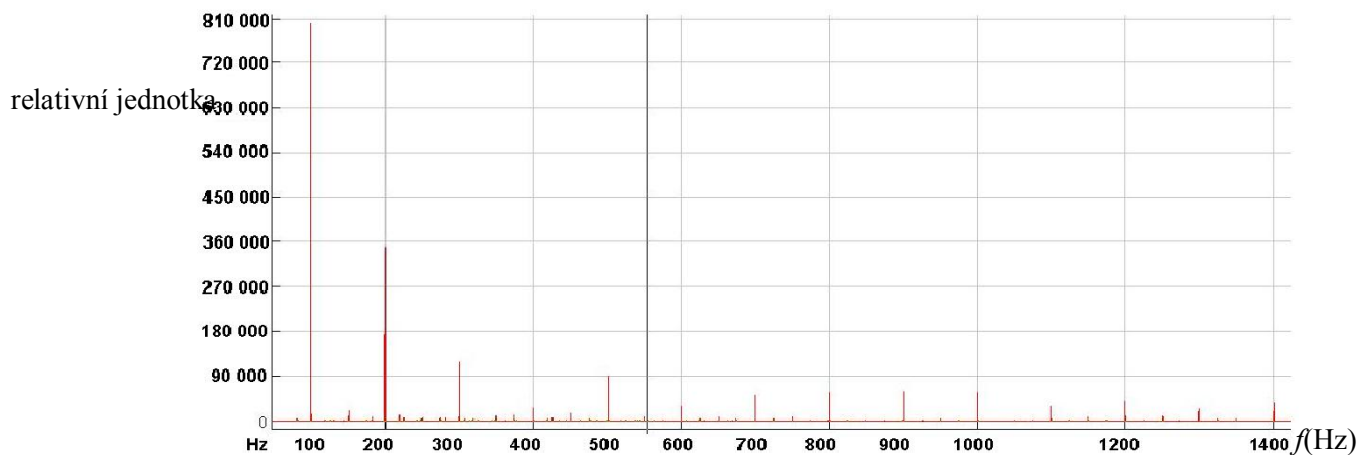


obr. 4-14 Spektrogram transformátoru T615 při chodu naprázdno

#### 4.2.2 Spektrální analýza transformátoru T615 v zatíženém stavu

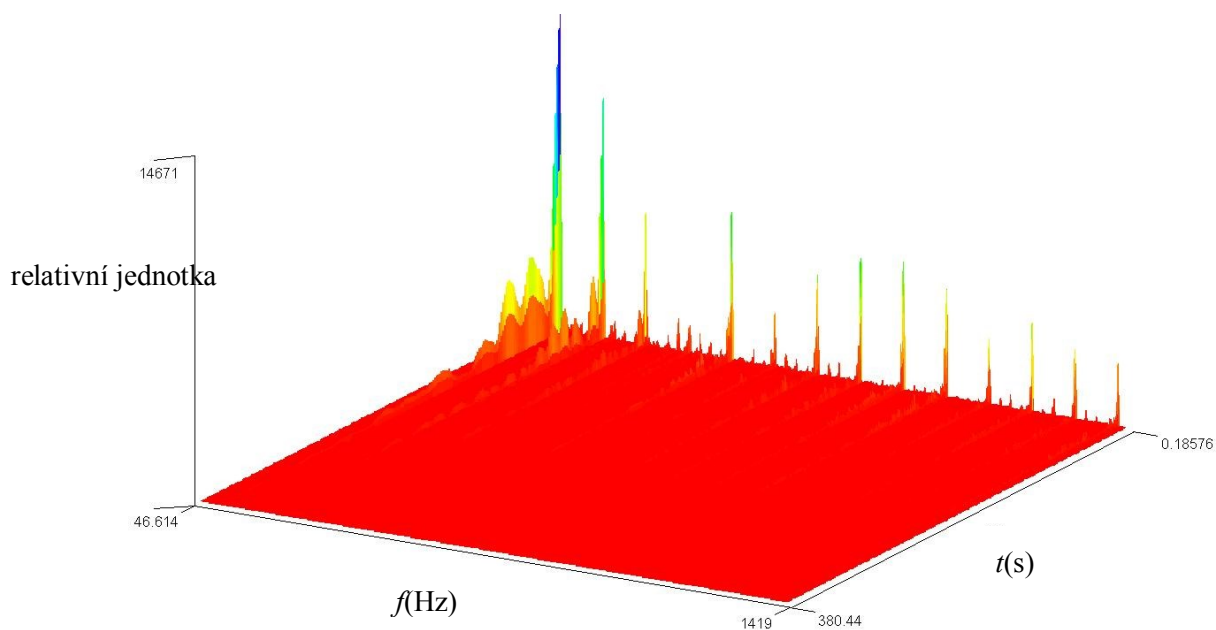
Po zatížení transformátoru se celý systém transformátoru spektrálně stabilizuje, utlumí se postranní pásma a nosnou hlukovou frekvencí zůstává 100Hz. Se zatížením transformátoru dochází k odsycení jádra a tedy také ke zmírnění harmonických vyšších řádů. Tento stav se potvrdil díky spektrální analýze transformátoru v zatíženém stavu (viz obr. 4-15). Velikost hluku transformátoru závisí na magnetickém toku, magnetický tok závisí na velikosti napětí a následně proudu naprázdno. Hluk transformátoru je tedy silně spojen s magnetizačními procesy. Nasycení jádra transformátoru při chodu naprázdno je vyšší. To je dáno návrhem, konstrukcí a typem použitých plechů. Jak je vidět z provedeného měření, podstatnou složku hluku tvoří také frekvenční složka 200Hz. Toto frekvenční pásmo je dáno magnetostrikčním efektem plechů, který bude nejvýraznější v oblasti maximální permeability. Toto místo je znázorněno na obr. 4-18 a na reálném záznamu z osciloskopu obr. 4-19. Se zatížením transformátoru se harmonické vyšších řádů po exponenciálně utlumují, což je svázáno s poklesem sycení jádra. Míra útlumu složky hluku 200Hz je dán průběhem proudu, z tohoto důvodu

zůstává ještě výrazně zastoupena frekvence 200Hz, která je sudým násobkem základní napájecí frekvence 50Hz. Sudé násobky základního kmitočtu jsou dány z podstaty magnetické indukce.



obr. 4-15 Spektrální analýza zatíženého transformátoru T615

Ze spektrogramu hluku zatíženého transformátoru na obr. 4-16 je patrné zvýraznění násobků harmonických.

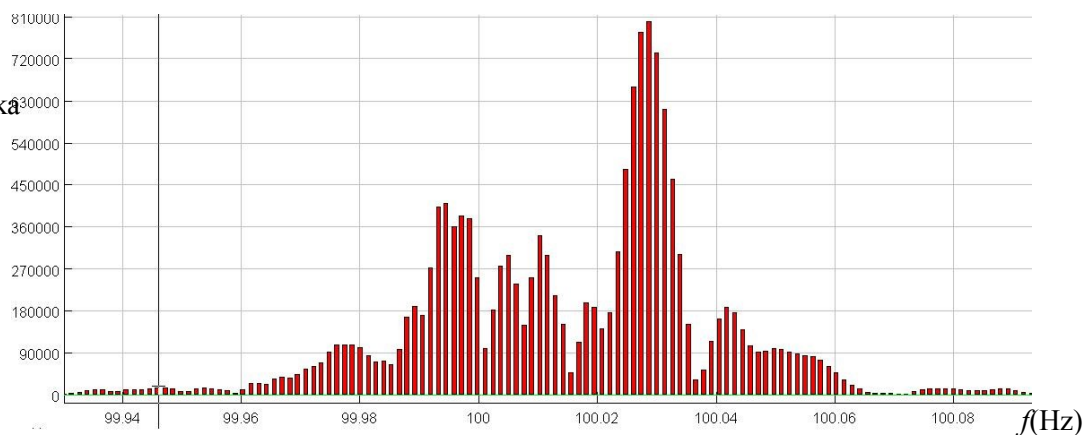


obr. 4-16 Spektrogram Zatíženého transformátoru T615

Z obr. 4-17 je jasné patrné, že frekvence sítě není přesně 50Hz, ale jsou v ní jemné odchylky, které musí být v systému eliminace hluku pomocí protifáze zohledněny. Při tomto měření bylo použito CPB analýzy, která přesněji určí hodnoty v jednotlivých sloupcích.

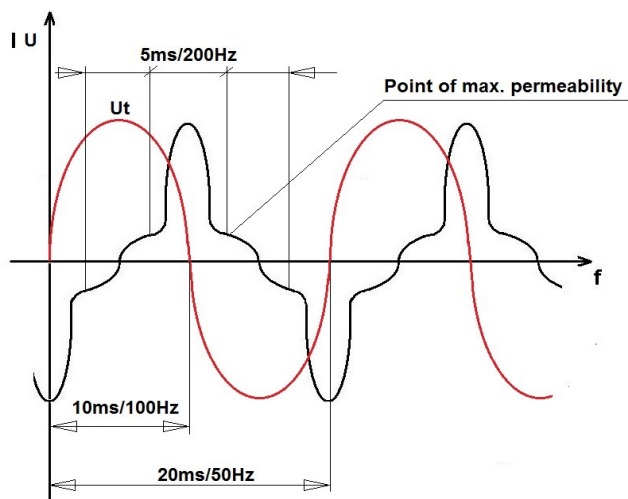


relativní jednotka

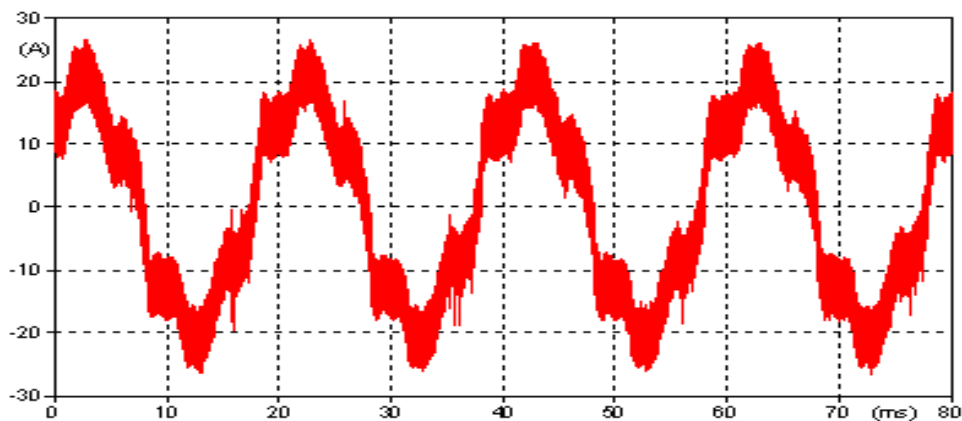


obr. 4-17 Zoom spektrální analýzy zatíženého transformátoru T615 pro frekvenci 100Hz

Z těchto měření jednoznačně vyplývá, že celý systém eliminace hluku transformátorů pomocí protifáze bude uzpůsoben výhradně k eliminaci hluků okolo 100Hz, popřípadě blízkých násobků tohoto kmitočtu. Toto platí u změřených transformátorů, v případě transformátorů s aktivním chlazením by byla situace složitější o analýzu hluku ventilátorů.

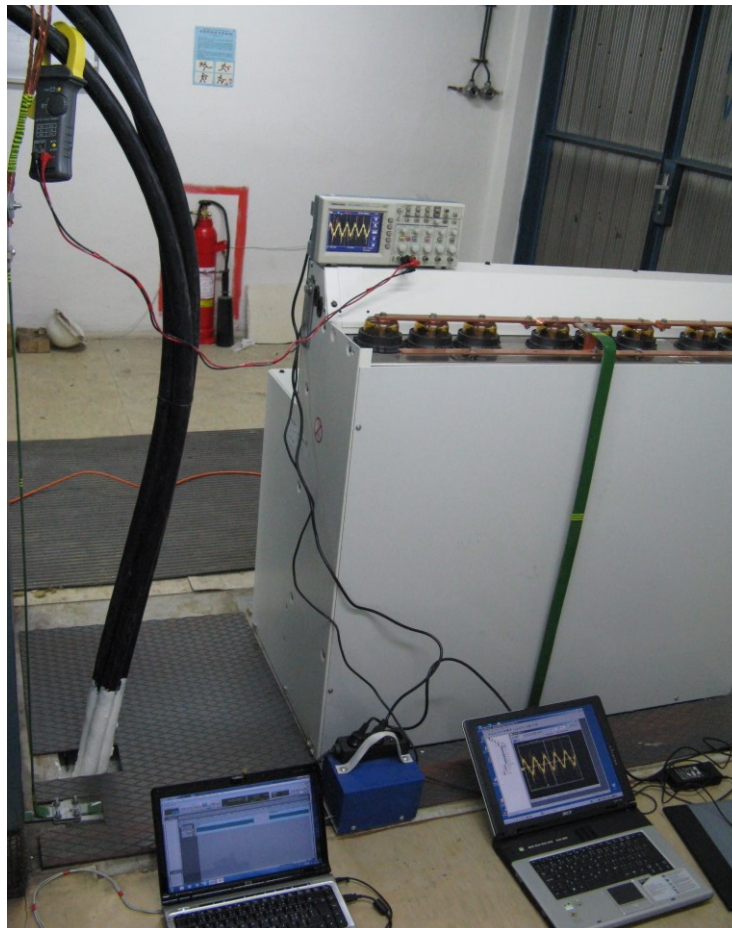


obr. 4-18 Obrázek ukazující teoretický průběh proudu



obr. 4-19 Obrázek ukazující skutečný průběh proudu při měření Transformátoru T615/1 (snímek z osciloskopu)

Na obr. 4-20 je zachyceno měření proudu na vstupním (primárním) kabelu k transformátoru T615-1, kde je vidět klešťová sonda připojená na jednu fázi vstupního kabelu. Tato sonda je připojena na digitální osciloskop, který okamžitý průběh posílá přes USB rozhraní do počítače. Počítač průběh zaznamenával a bylo z něj tedy možné průběhy zpětně vyvolat, popřípadě z nich pořídít snímky či rovnou tisk.



obr. 4-20 Měření proudu procházejícím primárním vinutím transformátoru T615/1

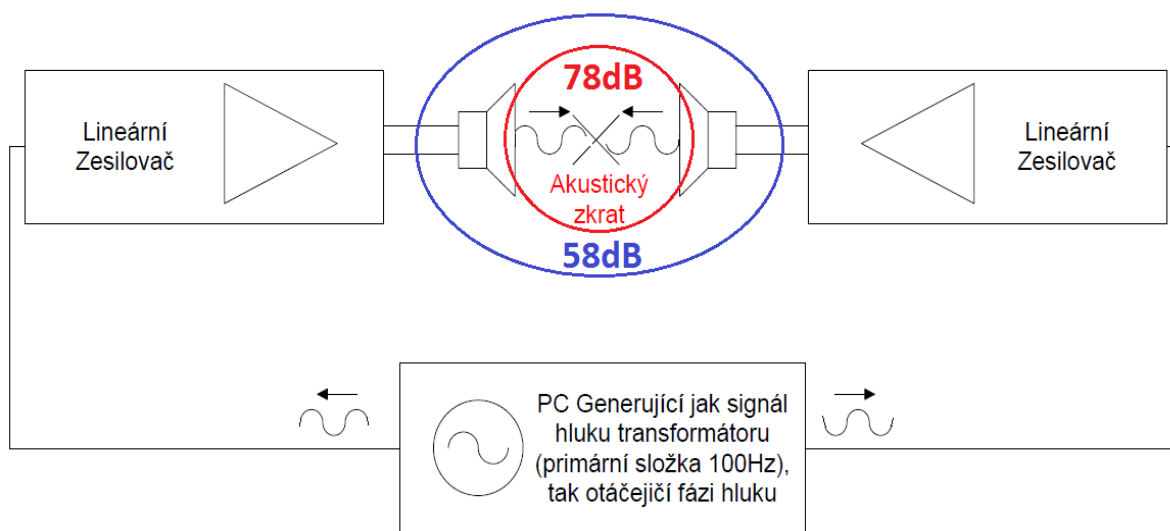
Tato akustická a elektrická měření probíhala kontinuálně také na dalších transformátorech, výsledky byly velice obdobné. Zvláště, co se týče nosných frekvencí, se jednotlivé transformátory nějak zásadně nelišily. Na základě těchto měření byl definován hluk transformátoru, jenž měl být eliminován. Tato měření probíhala v průběhu tři čtvrtě roku tak, aby bylo možno pořídít data ze všech provozních stavů měřených transformátorů. V letních měsících také byla pořizována data ze stavů naprázdno a dokonce hluková pozadí samotných místností při ojedinělé noční odstávce budov univerzity od proudu. Naopak v zimních měsících byly vyhledávány hodiny, kdy byla škola maximálně energeticky vytižena. Z pořízených údajů, záznamů a dat byly vyhodnoceny nejen další prvky systému, ale také další postup při tvorbě Protifázového eliminátoru.

### 4.3 Konstrukce protifázového modelu

Po výběru zařízení Výkonového transformátoru a jeho následných akustických měření a spektrálních analýzách mohlo dojít k realizaci prvního prototypu zařízení eliminující jeho hluk pomocí protifáze. Spektrálními analýzami hluku transformátorů bylo dospěno k závěru, že bude toto zařízení konstruováno na eliminaci nejsilnější frekvenční složky, kterou je frekvence 100Hz. Protože testování nemůže z bezpečnostních důvodů probíhat na transformátoru samotném, muselo být vytvořeno speciální měřicí pracoviště, jež simulovalo reálný hluk transformátoru. Základ modelu tedy tvoří dva sloupové stojany osazené totožnými reproduktory, z nichž jeden simuluje hluk transformátoru a druhý stojan produkuje protifázovou vlnu, jež způsobuje akustický zkrat. Na tyto dva stojany jsou dále aplikovány různé typy schematických zapojení a jsou testovány jak akustické účinnosti, tak spotřeba systému a další veličiny.

#### 4.3.1 Schematické navržení protifázového modelu

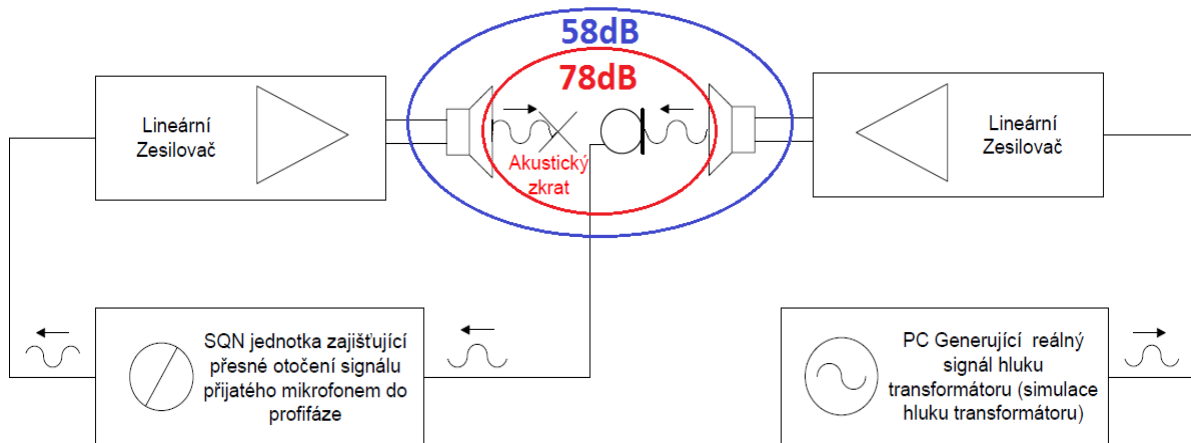
V první fázi byl navržen jednodušší systém, který má ověřit funkčnost všech základních prvků. Jde tedy o systém, který pracuje pouze s počítačovou simulací, (viz obr. 4-21). Tato simulace do jednoho lineárního zesilovače vyšle signál o frekvenci 100Hz. Toto je nosná frekvence hlukových emisí transformátoru. Zesilovač vybudí reproduktor na 78 dB, což představuje reálnou intenzitu hluku transformátoru. Z druhého kanálu vyšle počítač totožný signál 100Hz, který je ale otočen o 180°. Tento signál je opět zesílen lineárním zesilovačem a vyslán do druhého protějšího reproduktoru.



obr. 4-21 Blokové schéma prototypu Protifázového eliminátoru

V druhé fázi, (viz obr. 4-22), je již systém vybaven navrženým mikrofonom, který přijímá hlukové emise. Tyto hlukové emise produkuje opět pravá část obvodu, ta je vybavena počítačem, který již v této fázi vysílá do lineárního zesilovače reálný záznam hluku transformátoru. Tento zesilovač budí reproduktor na naměřenou hodnotu akustických emisí transformátoru 78dB. Pravá část obvodu tedy simuluje skutečný transformátor. Levá část obvodu nyní začíná námi navrženým mikrofonom, který z těsné blízkosti snímá zvuk transformátoru. Snímaný akustický signál posílá do

jednotky SQN což je analogové zařízení, které obrací mikrofonní fázi v reálném čase a plní tedy funkci fázového kontroleru. V této jednotce se dá také částečně upravit frekvenční rozsah, ale pro náš případ je jiný zásah, krom otočení fáze, nechtěný. Takto otočený signál putuje do lineárního zesilovače, který vybudí reproduktory na potřebný výkon. Za dodržení určité vzdálenosti reproduktů od sebe dochází k akustickému zkratu a tedy k vyrušení nežádoucích akustických emisí.



obr. 4-22 Blokové schéma prototypu Protifázového eliminátoru

Zařízení je v této fázi navrženo tak, že k samotnému otočení fáze dochází analogovou cestou, ta je totiž zatím rychlejší než signálová digitalizace. Digitalizace signálu by byla kvalitnější, ale znamenala by časové prodlevy při vzorkování a otáčení signálu. Proto je zatím volena analogová cesta. Jednotka SQN je tedy zařízení, které obsahuje mikrofonní předzesilovač a analogový vstup který přijme signál z mikrofonom. Na vstupu tohoto kanálu se dá jednoduše přepnout otočení fáze a takto otočený signál je z analogového výstupu jednotky SQN poslán na vstup zesilovače. Ten signál zesílí a vybudí reproduktor, který vyšle protifázovou vlnu proti parazitnímu hluku.

#### 4.3.2 Stavba modelu Protifázového eliminátoru

Návrhem schémat bylo ujasněno, jak bude model koncipován a mohlo se přejít ke konstrukci samotné. Protože model vyžadoval velké objemy dřevěného konstrukčního materiálu, bylo ke stavbě přistupováno speciálním způsobem. Celá konstrukce je totiž zhotovena z dřevěného odpadu. Předpokládá se, že po sérii testů a měření se samotný prototyp pro eliminaci v provozu používat nebude a Protifázový eliminátor bude profesionálně a specializovaně zkonstruován znovu podle tohoto modelu. Zvolený postup je nejen výrazně ekonomičtější, ale také ekologičtější.

Samotná konstrukce se skládá ze dvou totožných stojanů, jenž jsou vybaveny totožným reprosazením. Stojan eliminátoru samotného se liší jen v tom, že má v horní části nad reproduktory ponechaný volný prostor, který je určen pro hlukoměr. Volný prostor má zabezpečit prostup parazitního hluku za konstrukci eliminátoru. Celá konstrukce je velice precizně antirezonančně vyztužena, aby nedocházelo k rušení testů díky uvolňování jednotlivých částí při dlouhodobém působení vysokých akustických tlaků.





obr. 4-23 Fotodokumentace stavby modelu Protifázového Eliminátoru

Model byl v první fázi zhotoven podle schématu 1 (viz obr. 4-23), šlo tedy o zapojení testujícího systému ve zjednodušeném frekvenčním pásmu a pouze v simulačním počítačovém režimu. Jako koncový zesilovač byl použit výrobek britské společnosti Carlsbro PA1670. Dále je v systému používána profesionální počítačová audiokarta M-Audio FasTrack Pro. Nedílnou součástí je i softwarové vybavení, jež se skládá z audio softwarů ProTools a Sequoia. Tyto programy pořizovaly záznamy zvuku a samotné otáčení signálů do protifáze. Dále jsou to programy Sia SmartLive 5 a Tone Generator. Sia SmartLive 5 je software provádějící reálná měření akustických veličin a zpracovává FFT a CPB analýzy v reálném čase, což umožňuje uživateli sledovat aktuální spektrografy. Na obr. 4-24 je již fotografie konstrukce celého fyzikálního modelu. Model byl v této fázi připraven k zahájení řady měření a testů. Z obrázku je patrná tylová část stojanu, vytvářející samotný protifázový signál. Je vidět, že ve velmi malé vzdálenosti stojí druhý sloup, simulující hluk transformátoru. Síťový kabel sloupu vytvářejícího protifázovou vlnu byl stále monitorován wattmetrem, který sledoval aktuální odebíraný výkon.

Po dokončení stavby protifázového modelu byl model střídavě zapojován podle schémat 1 obr. 4-21 a 2 obr. 4-22. Tato dvě zapojení byla také kombinována v rámci dosažení co nejlepších výsledků. Značné problémy způsobovala u zapojení č. 2 zpětná vazba mikrofonu.

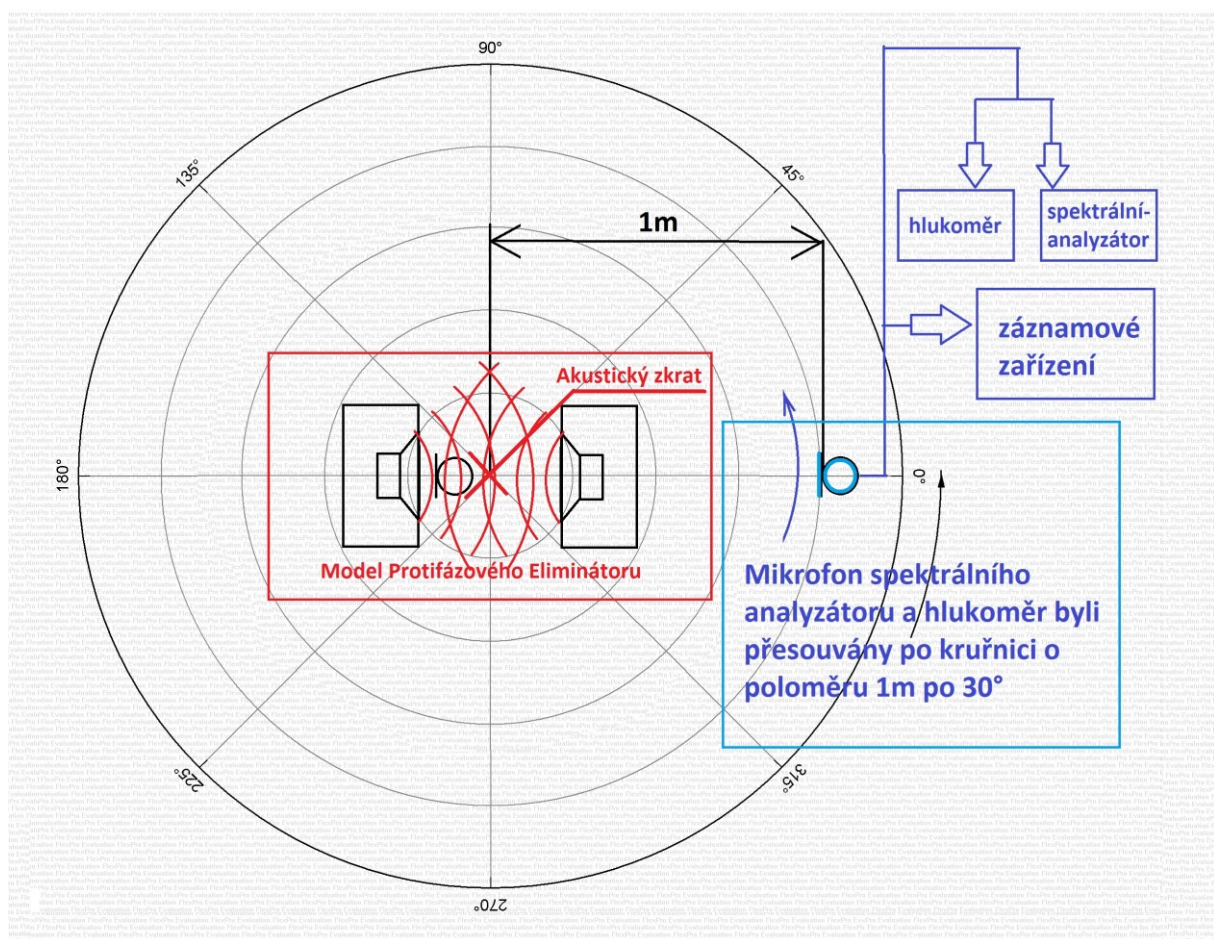
**Zpětná vazba** - V elektroakustice způsobuje zpětná vazba známé „pískání“, kdy se výstupní zvuk z reproduktorů dostane zpět na mikrofonní vstup, je zesílen do reproduktorů a zesílený signál opět přijat mikrofonem. Tento jev je též znám pod pojmem Larsenův efekt, podle dánského vědce (Søren Larsen), který první popsal tento princip. Limitem, který v tomto případě nastoupí, je výstupní výkon zesilovače. [23]



obr. 4-24 Model Protifázového eliminátoru při měření intenzity hluku.

## 4.4 Výsledky testů modelu Protifázového eliminátoru

Po dokončení tvorby modelu byla zahájena série měření. Nejdůležitějším měřením bylo zjištění poklesu úrovně hluku transformátoru po zapnutí modelu Protifázového eliminátoru. Prvotní měření probíhala takto. Kolem modelu byla vytvořena pomyslná kružnice o průměru 2m tak, aby byl hlukoměr vzdálen vždy 1m od zdroje hluku. Kružnice byla rozdělena po 30°, vzniklo tedy 12 měřicích míst, které se dodržovaly u všech následujících měření. V těchto bodech byla potom primárně prováděna měření poklesu hluku, ale dále také spektrální analýzy a záznamy hluku při působení prototypu. Při měření intenzity hlukoměrem byla zvolena složitější, ale přesnější metoda záznamu. Tato metoda spočívá v tom, že je hluk měřen v určitém časovém úseku, ve kterém je zaznamenána jeho maximální a minimální hodnota a ta je následně zprůměrována. Výsledná hodnota je tedy průměr minima a maxima za daný časový úsek. Všechny tyto hodnoty jsou zapsány v následujících tabulkách. Výsledky byly z důvodu přehlednosti a orientace zaneseny do polárních grafů, jen ve výsledném porovnání bylo využito jak polárních, tak standardních grafů. K vytvoření polárních grafů byl použit software FlexPro.



obr. 4-25 Schéma zapojení a znázornění provedených akustických testů



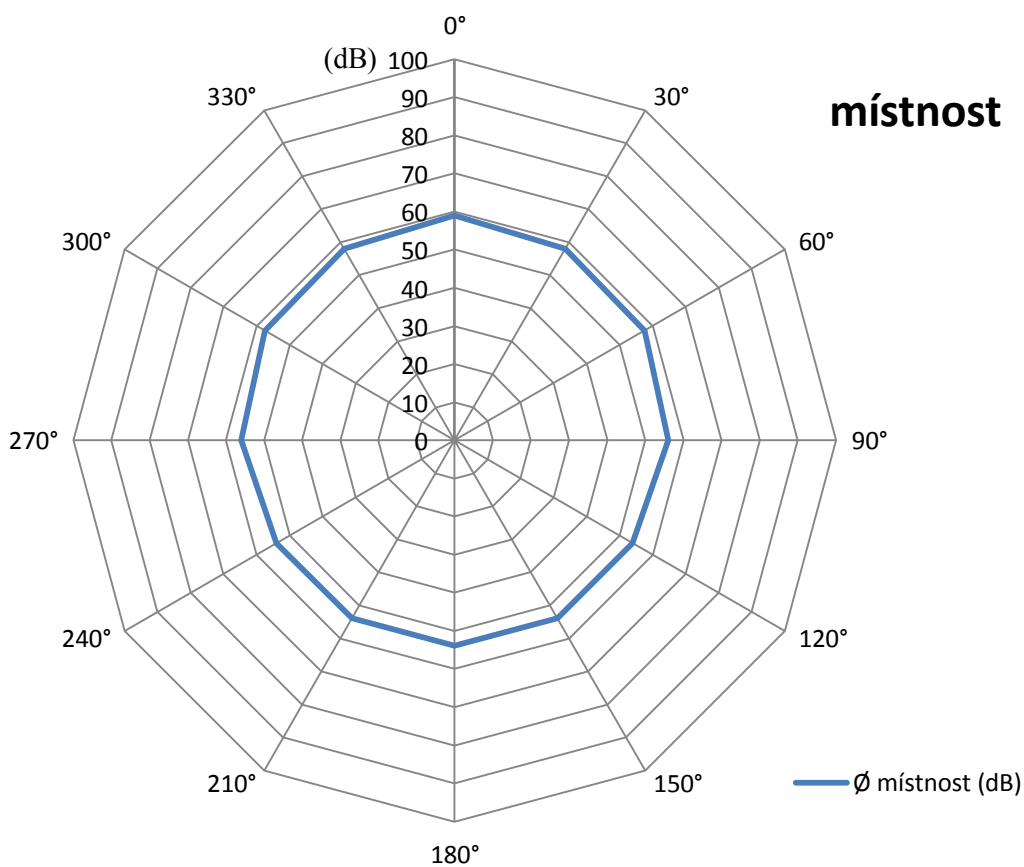
#### 4.4.1 Měření hluku místnosti

První měření proběhlo pouze jako měření hluku místnosti, ve které je zařízení umístěno. Oba stojany, jak protifázový tak simulační, stály proti sobě. Ani jeden z nich však nevykonával svou činnost. Zařízení potřebná pro provoz, modelu, však byla v chodu. Do této hladiny tak spadají také ventilátory zesilovačů, notebooků a hluk všech zařízení nezbytných pro chod modelu, plus samozřejmě také přirozený hluk místnosti.

Ve všech 12ti bodech byla změřena hladina akustického tlaku. Měření bylo provedeno třikrát a výsledné hodnoty byly zprůměrovány. Výsledkem měření je polární graf zobrazující úroveň hluku v okolí 1m od středu modelu. Střed grafu vždy reprezentuje umístění modelu Protifázového eliminátoru. Intenzita hluku v místnosti se pohybovala mezi 58,9 a 53,9 dB. Příklad naměřených hodnot (viz tab. 4-1).

tab. 4-1 Intenzita hluku v laboratoři

úhel	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
min (dB)	57	55,3	54,3	51,1	47	47	47	47	47	51,1	54,3	55,3
max (dB)	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8
Ø (dB)	58,9	58,05	57,55	55,95	53,9	53,9	53,9	53,9	53,9	55,95	57,55	58,05



obr. 4-26 Polární graf intenzity hluku v místnosti

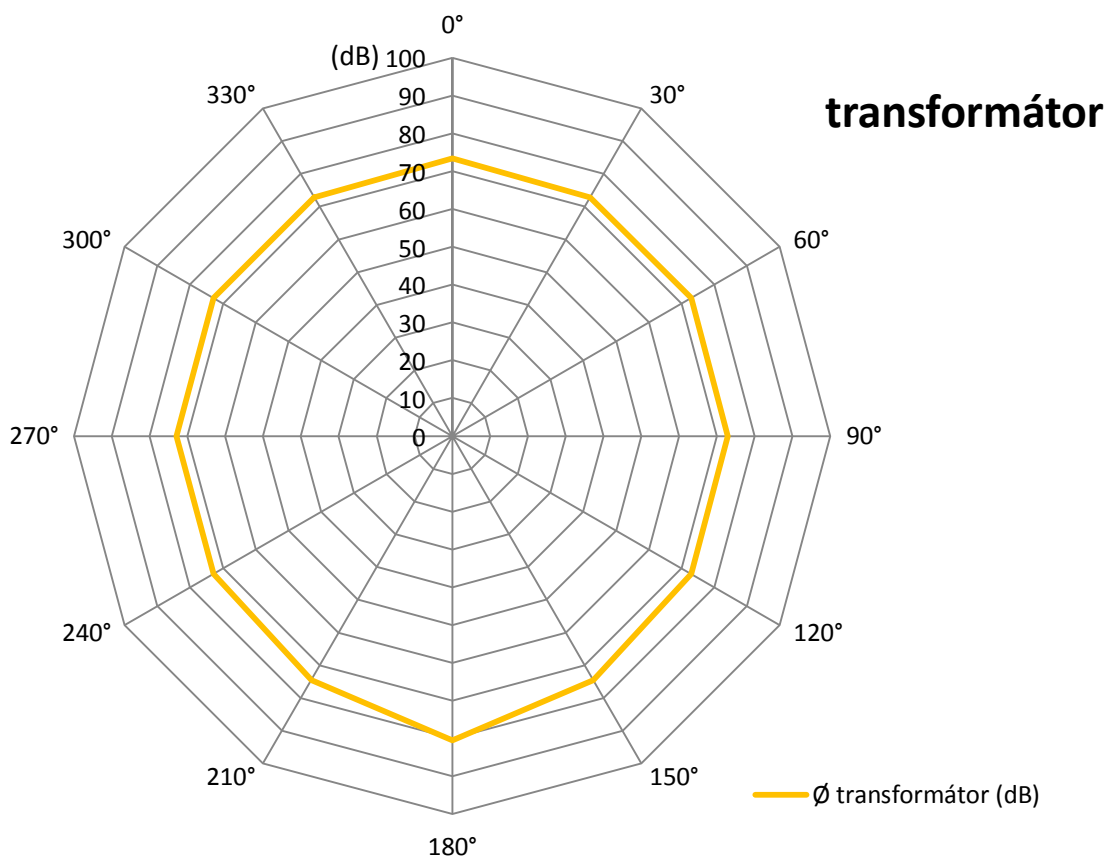


#### 4.4.2 Měření hluku transformátoru

Po změření intenzity akustického pozadí místnosti byla zapnuta simulace hluku transformátoru. Ze záznamů při měření hluku transformátorů byla vytvořena smyčka, která vytvořila simulaci hluku transformátoru. Simulace byla prováděna, jak konkrétními nosnými frekvencemi tzn. 100Hz atd., nebo také přímo pořízeným záznamem hluku transformátoru. Vždy však tvořila simulačně hluk, který byl svou intenzitou totožný s transformátorem.

tab.4-2 Intenzita hluku simulovaného transformátoru

úhel	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
min (dB)	70,5	69,5	69,5	69,5	69,5	69,5	79,3	69,5	69,5	69,5	69,5	69,5
max (dB)	76,3	76,3	76,3	76,3	76,3	79,5	81,8	79,5	76,3	76,3	76,3	76,3
Ø (dB)	73,4	72,9	72,9	72,9	72,9	74,5	80,55	74,5	72,9	72,9	72,9	72,9



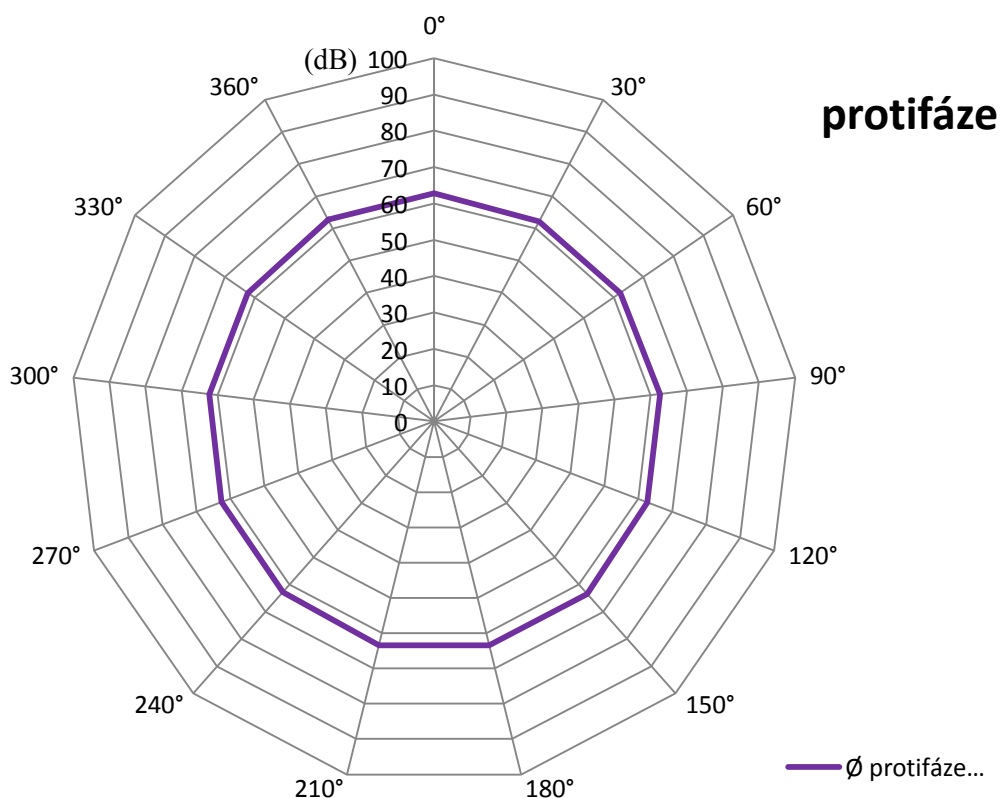
obr. 4-27 Polární graf intenzity hluku transformátoru

#### 4.4.3 Měření hluku po aktivaci Protifázového eliminátoru

Z grafu je patrné, že při působení modelu Protifázového eliminátoru klesla hladina akustického tlaku v místnosti v průměru o necelých 20dB.

tab. 4-3 Intenzita hluku po aktivaci protifázového eliminátoru

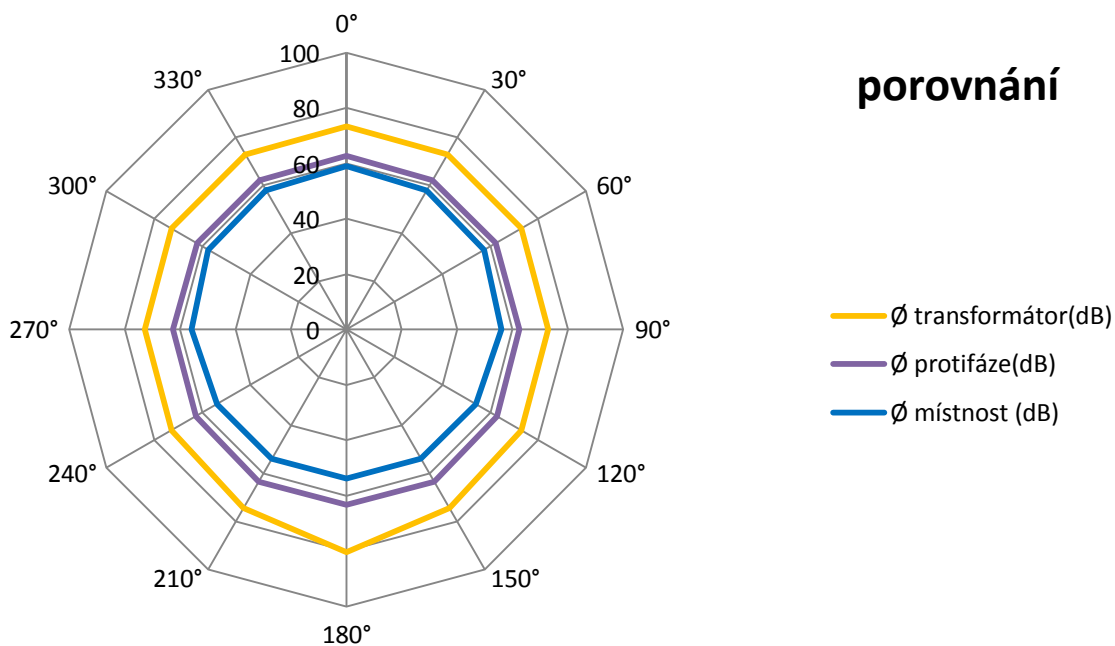
úhel	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
min (dB)	60,6	59,6	59,6	61,6	61,6	61,7	61,8	61,7	61,6	61,6	59,6	59,6
max (dB)	64,9	64,9	64,9	63,5	63,7	65,1	65,1	65,1	63,7	63,5	64,9	64,9
Ø (dB)	62,75	62,25	62,25	62,55	62,65	63,4	63,45	63,4	62,65	62,55	62,25	62,25



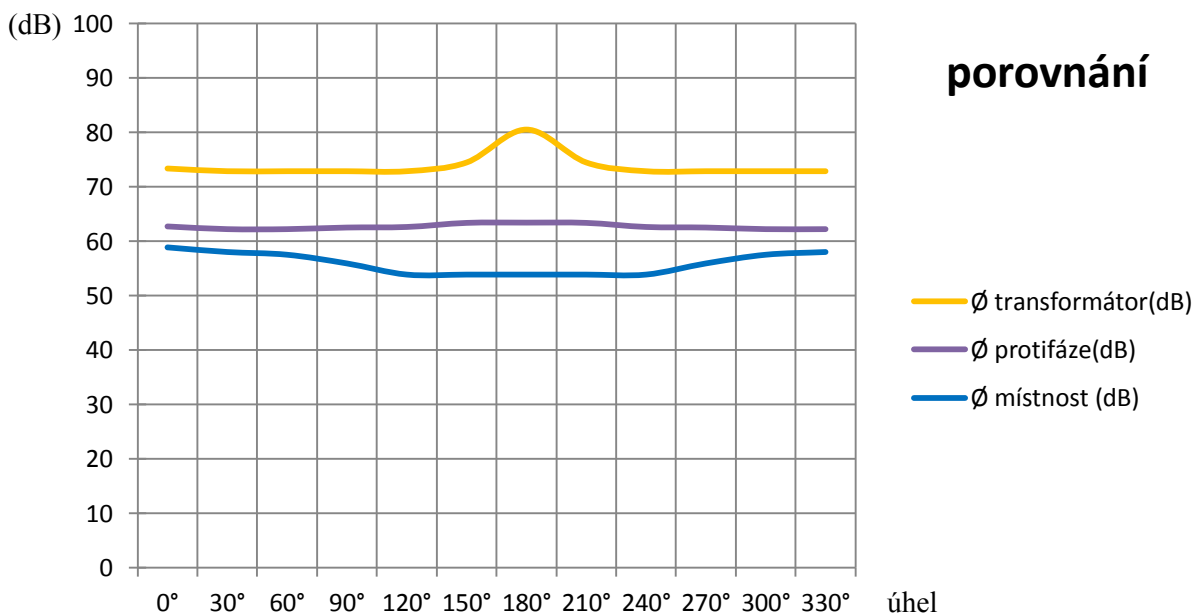
obr. 4-28 Polární graf intenzity hluku transformátoru eliminovaného modelem

#### 4.4.4 Porovnání výsledků

Zde jsou uvedeny dva grafy pořízené z měření modelu Protifázového eliminátoru zapojeného dle schématu 1. (viz obr. 4-21). Jak z polárního, tak z klasického grafu je patrné, že eliminace byla úspěšná. Modrou barvou je naznačen původní hluk v místnosti, oranžová znázorňuje hluk v místnosti pro simulaci transformátoru a růžovou je znázorněna intenzita akustického tlaku po zapnutí eliminátoru.



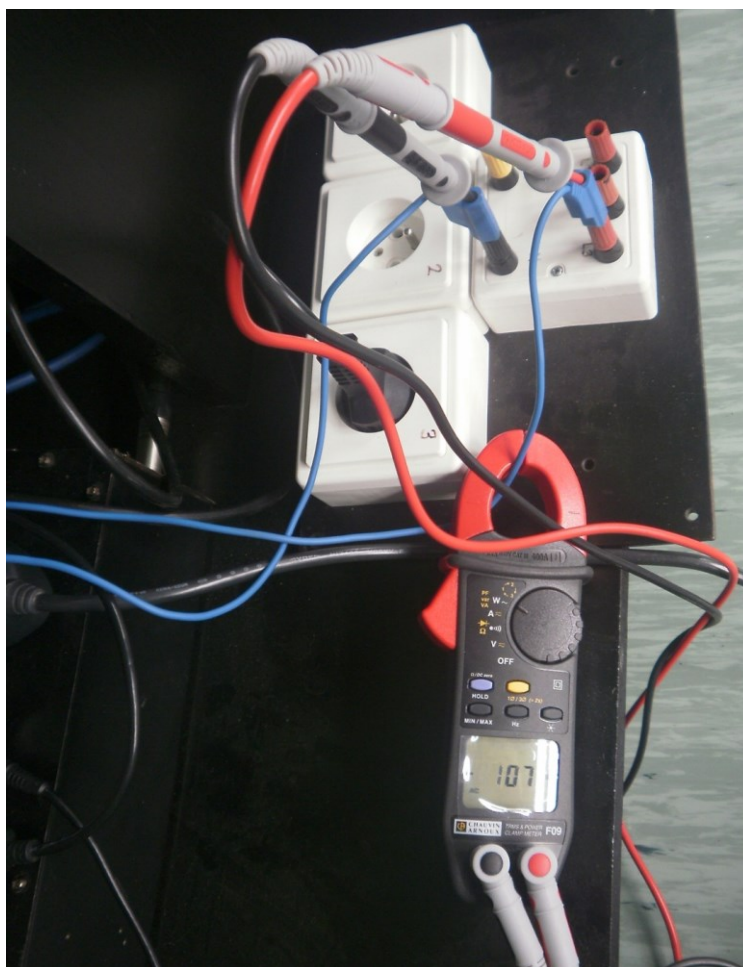
obr. 4-29 Závislost intenzity na vzdálenosti mezi vodiči



*obr. 4-30 Závislost intenzity na vzdálenosti mezi vodiči*

#### 4.4.5 Spotřeba modelu Protifázového eliminátoru

Velice častou otázkou, která je pokládána vzhledem k prototypu, je jeho spotřeba. Výkon byl změřen za provozu, kdy prototyp eliminoval hluk transformátoru okolo 80 dB. Měření tedy probíhalo při eliminaci reálného hluku transformátoru. Hodnota odebíraného výkonu se pohybovala okolo 100W. Na obr. 4-31 je fotografie maximální naměřené hodnoty spotřebovávaného výkonu Protifázového eliminátoru při eliminaci hluku při hodnotě 80dB. Spotřeba 100W je velice příznivá vzhledem k tomu, že transformátor přenášel výkon 330kW. Je tedy možné říci, že vlastní spotřeba eliminátoru činila 0,0033% přenášeného výkonu.

*obr. 4-31 Hodnota odebíraného výkonu Protifázového eliminátoru*

#### 4.4.6 Zhodnocení výsledků testů modelu Protifázového eliminátoru

Intenzita hluku v místnosti se pohybovala mezi 58,9 a 53,9 dB. Po tomto základním měření byl v místnosti simulován hluk transformátoru, ať už v jeho skutečné podobě nebo jen jako jeho nosné frekvence. Tento hluk byl buzen na skutečnou intenzitu hluku transformátoru v provozu a dosahoval tedy téměř 80dB.

Při zapojení modelu Protifázového eliminátoru dle 1. schématu (viz obr. 4-21) byl model velice účinný. Eliminace v tomto zapojení dosahovala téměř 20dB, jednalo se tedy o snížení akustického tlaku o celý jeden řád a intenzita akustického tlaku v místnosti tak klesla desetkrát. Také sluchový vjem byl velmi patrný. Po uvedení modelu do chodu se dalo říci, že se hladina hluku v místnosti vrátila na původní hodnotu i přes to, že byl v té chvíli simulován hluk transformátoru.

Při zapojení modelu dle zapojení č. 2 (viz obr. 4-22) docházelo k několika nechtěným jevům. Největší problém působila zpětná vazba mikrofonu. Ta byla odstraněna pomocí změn jednotlivých vzdáleností např. mikrofonu od reproduktoru simulujícího hluk transformátoru, nebo reproduktorových stojanu vzájemně.

Z testů modelu bylo vytvořeno několik zásadních závěrů. Nejzásadnějším bylo zjištění, že systém může být velice účinný i přesto, že je umístěn v běžné místnosti a situace se tak komplikuje odrazivostí stěn. Systém je účinný natolik, že snížil hladinu hluku v místnosti téměř na původní hodnoty hluku v místnosti bez simulace transformátoru. Zásadním problémem systému je zpětná vazba, která celý systém činí nefunkčním. Podstatné jsou také vzdálenosti jednotlivých komponent od sebe. Ty ovlivňují nejen právě tvorbu zpětné vazby, ale také účinnost samotné eliminace. Čím větší vzdálenost mezi reproduktory, tím nižší účinnost.

Podstatná je také velikost reproduktoru, byly provedeny jednoduché testy záměn reproduktorů a z testů vyplynulo, že eliminační reproduktor by měl co nejlépe pokrývat pomyslnou vlnoplochu zářiče, v našem případě tedy tělesa transformátoru.

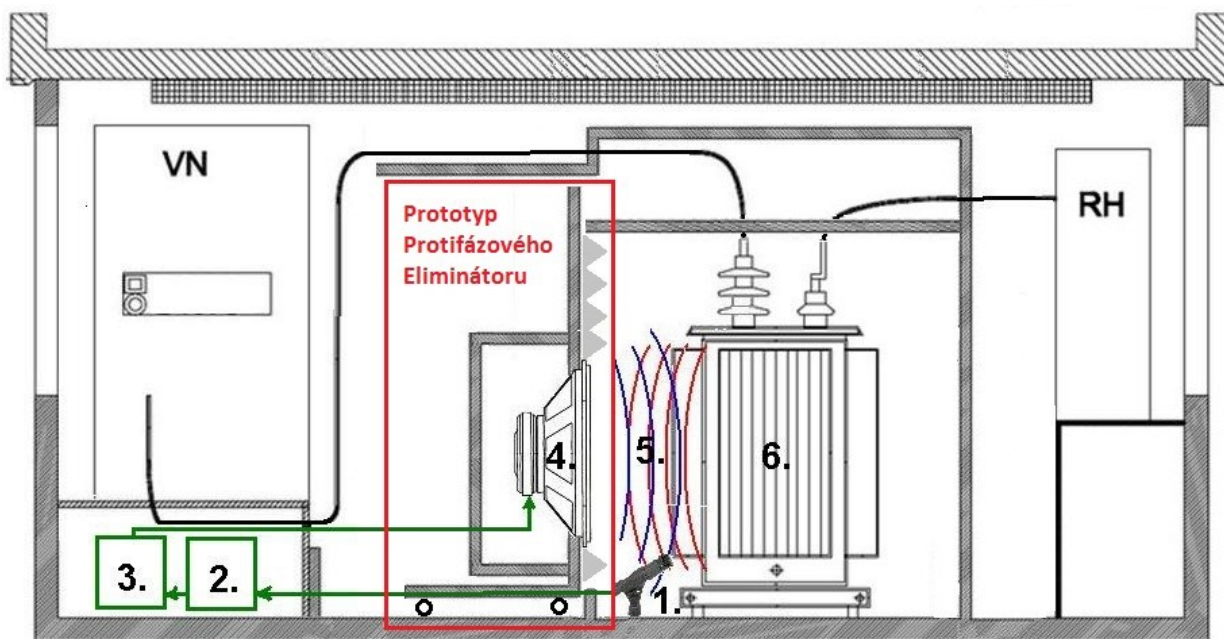
Lepší účinnosti dosahoval model v případech, kdy eliminoval konkrétní frekvence, byl tím potvrzen předpoklad, že složitost frekvenčního spektra bude působit eliminátoru problémy.

Model byl řádně otestován, změřen a na základě dosažených výsledků byl prohlášen za funkční.

Na základě výsledků dosažených modelem Protifázového eliminátoru bylo přikročeno ke konstrukci prototypu, který bylo možno testovat na reálném transformátoru.

## 4.5 Konstrukce prototypu Protifázového eliminátoru

Nejprve bylo nutno udělat náčrt s rozmyslem toho, jak by měl eliminátor vypadat. V úvahu připadalo nepřeberné množství variant, jak bude konstrukce provedena. Takovýto přístroj nebyl ještě nikdy před tím navržen, a proto se nebylo možné inspirovat konstrukcí někoho jiného. Zpočátku bylo zamýšleno vložit eliminátor do samotného krytu transformátoru, (viz obr. 2-1 na str. 14), od tohoto záměru bylo postupem doby a také na základě všech výsledků měření upuštěno. Nejen, že by bylo nutné zasáhnout do konstrukce krytu transformátoru, ale další úpravy by byly velice znesnadněny. Jak vyplynulo z měření na modelu Protifázového eliminátoru, podstatné jsou vzdálenosti jednotlivých komponent, které by byly při zabudování reproduktoru do krytu pevné. Dále by při každé úpravě systému musela být energie z transformátoru přesměrována. Proto byla navržena konstrukce oddělená od transformátoru. Byl navržen rám, který by nesl celou konstrukci Protifázového eliminátoru. To, jestli bude rám nositelem veškerého přístrojového vybavení, bylo zváženo po instalaci na transformátor a posouzení možného rušení přístrojů VN. Na obr. 4-32 je v červeném poli zvýrazněna konstrukce Protifázového eliminátoru, který je přiblížen na nejbližší možnou vzdálenost k samotnému transformátoru při otevřeném krytu. Z náčrtu je patrné, že konstrukce bude posuvná, je tomu tak z důvodu usnadnění manipulace s eliminátorem a možnosti změny vzdáleností.



- |                              |                    |
|------------------------------|--------------------|
| 1. Měřicí mikrofón           | 4. Reproduktor     |
| 2. Řídící jednotka profifáze | 5. Akustický zkrat |
| 3. Zesilovač                 | 6. Transformátor   |

obr. 4-32 Blokové schéma prototypu Protifázového eliminátoru

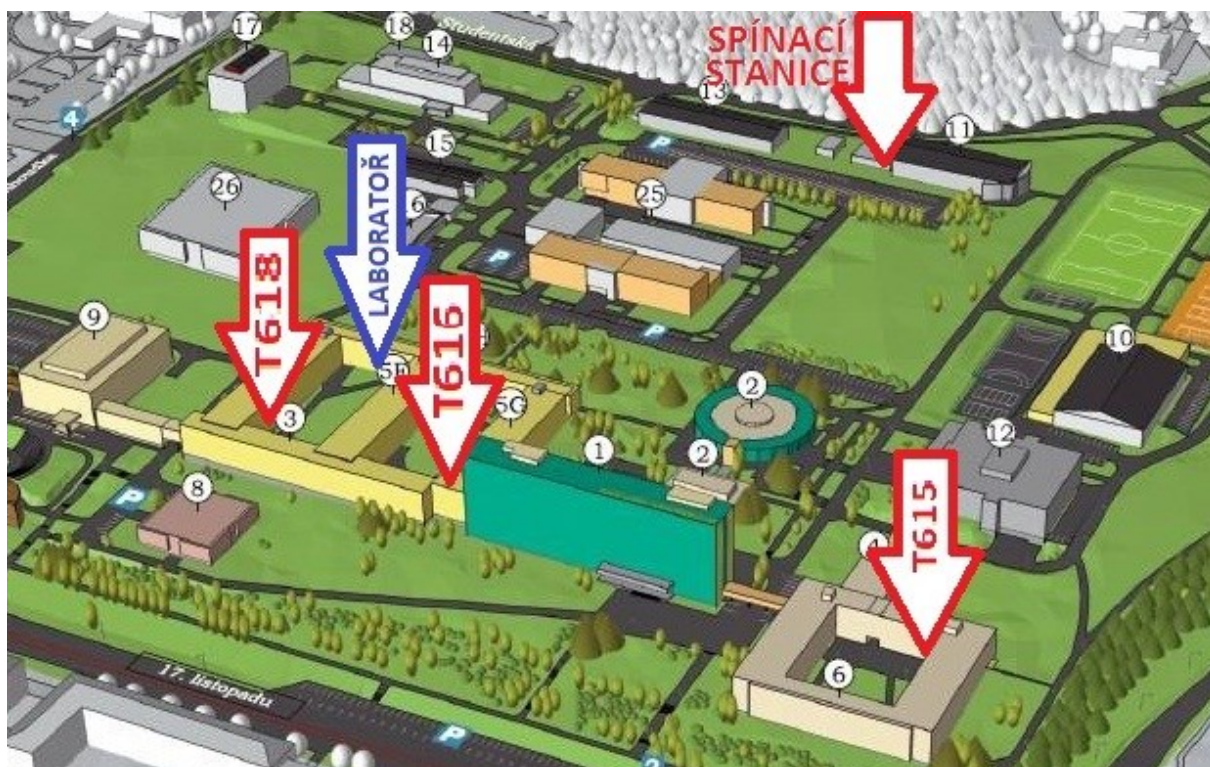
Oproti původnímu záměru se také konstrukce liší v tom, že bude eliminace prováděna pouze z jedné strany. Důvodem je již tak náročná složitost šíření akustických vln. Z měření na modelu eliminátoru víme, že velkým problémem je tvorba zpětné vazby systému. Působení dvou reproduktorů



proti sobě by znamenalo velké problémy s tímto jevem. Pro ověření funkce bude celý prototyp jednostranný.

#### 4.5.1 Výběr vhodného transformátoru

Po dokončení testů modelu Protifázového eliminátoru, které potvrdily jak teorii, tak počítačové simulace a bylo tedy rozhodnuto k přikročení tvorby prototypu, bylo nutné provést rekognoskaci všech měřených trafostanic. Při tomto průzkumu byly zaznamenávány rozměry jednotlivých transformátorů, místností ve kterých jsou transformátory umístěny, rozložení přívodních kabelových vedení do transformátoroven a také do samotných transformátorů, velikost vstupních vrat či průchodů a prostor kolem transformátorů. Tyto parametry byly rozhodující nejen kvůli umístění budoucího prototypu, ale také kvůli jeho konstrukci samotné. Bylo nutné skloubit všechny tyto rozměry, dále elektrické parametry a v neposlední řadě také akustické podmínky. Na obr. 4-33 je již vidět rozložení areálu VŠB – TUO a jejích transformátoroven, ve kterých byla prováděna prvotní akustická měření. Dále je v mapě zakreslena Laboratoř HA 204, kde byl prototyp konstruován.



obr. 4-33 Mapa areálu VŠB-TUO s naznačením rozložení trafostanic. [10]

Podstatným kritériem pro výběr byla také vzdálenost, kterou by prototyp musel urazit po areálu školy, aby se dostal do trafostanice. Na základě všech těchto kritérií byly vybrány transformátory T618 na budově E a také T616 na budově G. Konečný výběr byl učiněn po navedení nového transformátoru do trafostanice na budově E, kde byl tímto novým transformátorem zastavěn vstup. Z tohoto důvodu byl tedy zvolen transformátor T616 na budově G, který byl následně ještě jednou detailně proměřen, aby mohla započít konstrukce samotná.



*obr. 4-34 Transformátor T616 vybraný k instalaci prototypu*

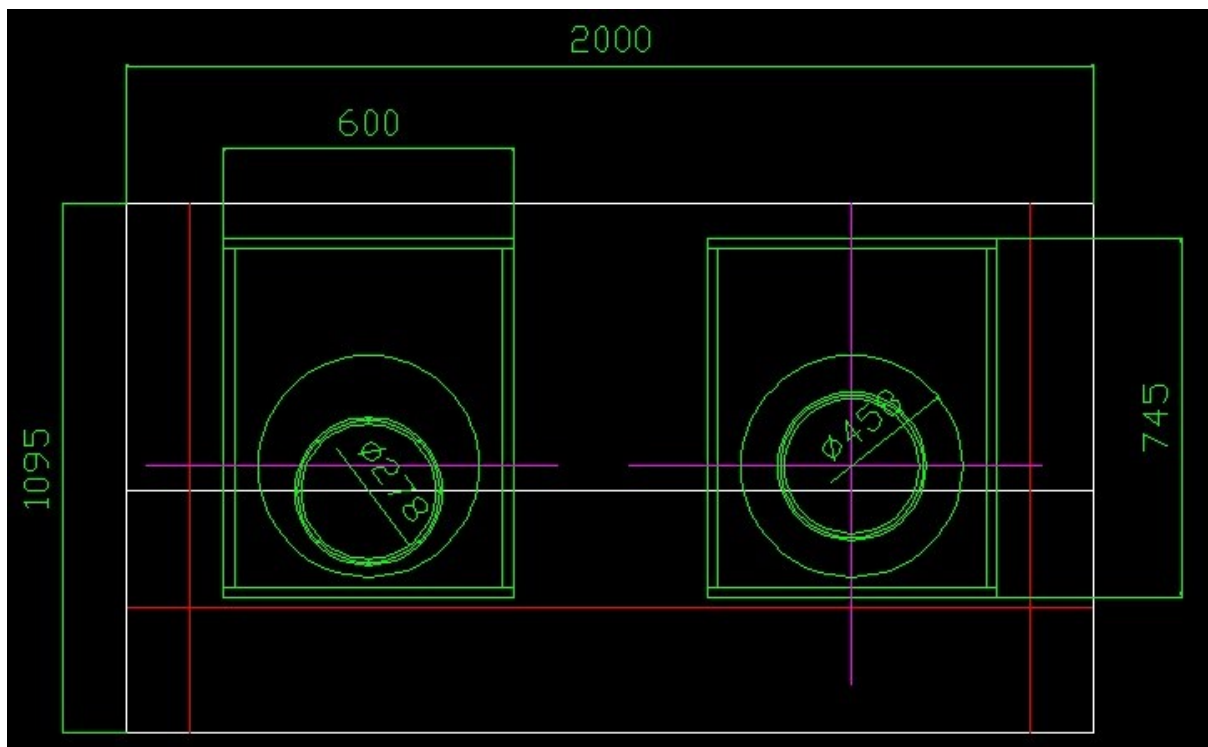
#### 4.5.2 Návrh konstrukce

Před započítím fyzické konstrukce byl proveden návrh. Tento návrh se stával z výkresů, které byly tvořeny v programu AutoCAD. V AutoCADu byly tvořeny také následné 3D modely, které napomáhaly v návrzích, jak by měl eliminátor vypadat, a jak by měl být umístěn před transformátorem. Na obr. 4-35 je již vidět jeden z těchto výkresů, podle kterých byl prototyp konstruován. Výkres také napomáhal při volbě rozměrů i rozvržení jednotlivých komponent Prototypu. Ukázalo se, že při tvorbě takto náročného a hlavně dlouhodobého projektu jsou simulace a návrhy naprosto nepostradatelnou součástí. Možnost softwarově upravovat rozměry konstrukce vůči komponentům a hlavně vůči transformátoru byla klíčová. Na obr. 4-36 je vidět 3D model dělicí poloroviny, která bude oddělovat prostor transformátoru, a zároveň v ní budou umístěny reproduktory eliminátoru samotného.

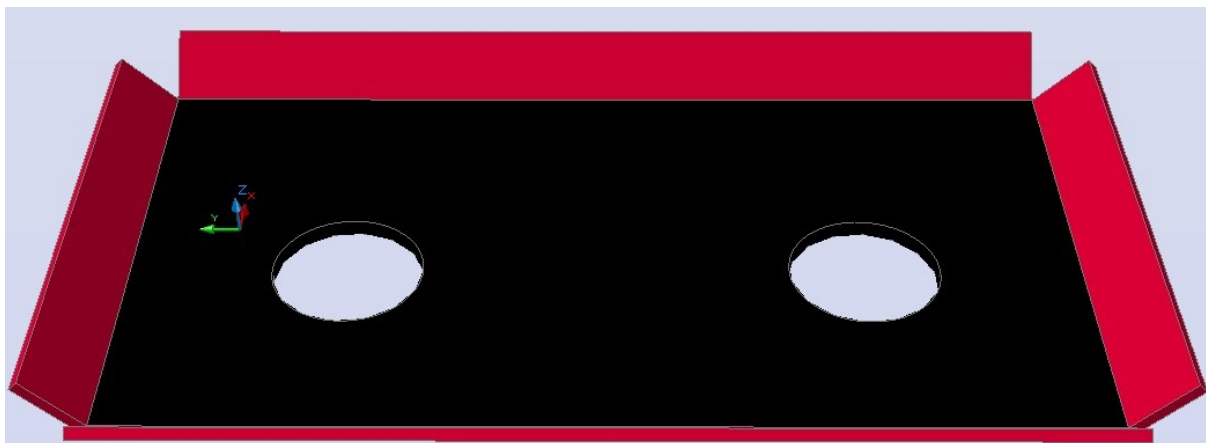
Popis výkresu na obr. 4-35:

- Bílou čarou jsou naznačeny obrysy dělicí poloroviny.
- Zelené čáry označují reproboxy, které budou pevně spojeny s dělicí polorovinou a také umístění samotných reproduktorů.
- Červená čára potom naznačuje rozměry a spojení nosného rámu s dělicí polorovinou v místech kde se oba objekty dotýkají.





obr. 4-35 Výkres dělicí poloroviny (obrysy bílou barvou) opatřené reproboxy (zelená barva)



obr. 4-36 3D model dělicí poloroviny opatřené experimentálními bočnicemi

#### 4.5.3 Stavba Protifázového eliminátoru

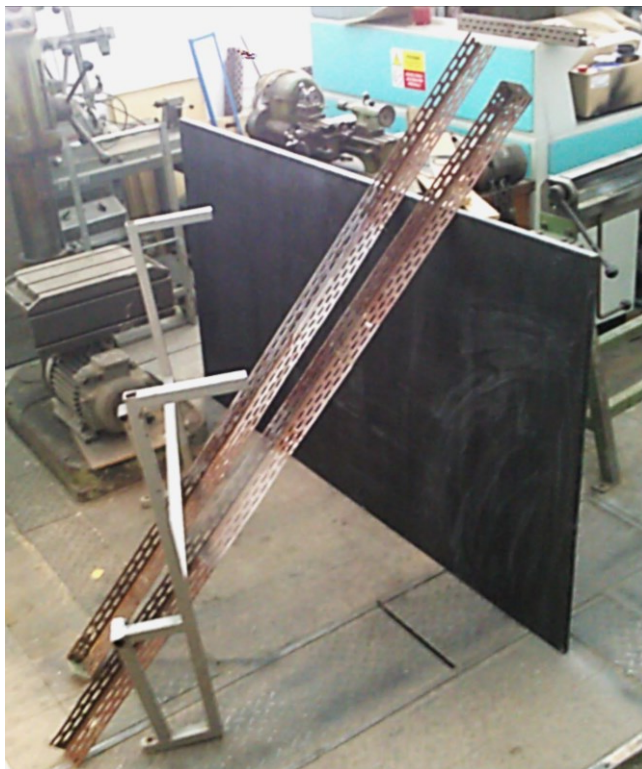
Podle návrhů a výkresů bylo započato s výstavbou prototypu Protifázového eliminátoru.

Celá stavba byla rozbělena několik základních etap:

- Zhotovení ocelové konstrukce, na které bude zařízení upevněno.
- Zhotovení dělicí poloroviny (desky) která bude oddělovat prostor transformátoru od zbytku místnosti a zároveň bude tvořit čelní část eliminátoru.
- Výroba samotných reproboxů, které budou připevněny na dělicí čelní stranu.
- Dokonalé vytmelení a vytlumení reproboxů proti stojatému vlnění.

- Kompletace reproboxů a čelní strany.
- Elektroinstalace.
- Výbava zkompletované čelní strany a reproboxů reproduktory.
- Výroba přípravku na mikrofon.
- Instalace přípravku na mikrofon do čelní strany eliminátoru.
- Potažení čelní strany Eliminátoru tlumícím materiálem Basotec.

Po tomto jednoduchém rozmyslu úkolů bylo potřeba shromáždit pro jednotlivé fáze materiál, ze kterého bude eliminátor zhotoven. V předchozí fázi, tedy při tvorbě modelu, byla konstrukce výhradně tvořena dřevným odpadem. V tomto případě již tomu tak není. Samotná nosná konstrukce je u prototypu tvořena ocelovými profily. Spoje jsou z větší části šroubové, je tomu tak, aby bylo možné konstrukci pohodlně rozmontovat, přemístit a smontovat na místě k tomu určenému. I v tomto případě však bylo částečně využito recyklovaných materiálů. Například některé nosné prvky jsou zhotoveny z konstrukčních materiálů na regály, staré školní lavice a velkou dělicí polorovinu tvoří stará školní tabule (viz obr. 4-37). Tento materiál je zcela bezzávadný a nebyl tedy jediný důvod jej nevyužít, když jím univerzita disponuje.



*obr. 4-37 Konstrukční materiál připravený k dělení*

Tvorba ocelové konstrukce probíhala podle následující fotodokumentace. Podle výkresové dokumentace byl materiál nejprve dělen na elektrické pile. Dále byla použita také uhlová bruska a to zejména v případě využití šrotového materiálu, který nemohl být do elektrické pily upnut. Na obr. 4-37 je již vidět využití takového šrotového materiálu, který tvoří základnu celé ocelové konstrukce.

Tento materiál byl také použit pro výhodnost jeho předdefinovaného tvaru, pro kvalitu strojových svarů, a také pro úhlovou a délkovou přesnost. Na obr. 4-38 je levá i pravá strana základové konstrukce sešroubovaná spojovacími tyčemi. Na základně jsou také připevněny vertikální nosníky z perforovaného plechu profilu L o tloušťce materiálu 2,5mm a materiálovém označení 11500 (konstrukční ocel). Tato tloušťka je tedy dostačující k tomu, aby konstrukce bez problému unesla celou výkonovou část eliminátoru.



obr. 4-38 Dělení a příprava materiálu nosného rámu



obr. 4-39 Spojování nosného rámu

Stojny rámu byly záměrně zvoleny z perforovaného materiálu, díky tomu může být celá dělicí polorovina posouvána téměř libovolně ve vertikální poloze, může být tedy měněna výška působících reproduktorů, které budou v polorovině umístěny. Celý systém je i v této fázi tvořen velmi flexibilně tak, aby mohl být v kterékoli fázi jednoduše modifikovatelný. Jedná se o prototyp, tedy není známo, jak se budou šířící se vlny chovat, z toho důvodu byla konstrukce vytvářena tak, aby mohly být během všech testů měněny nejen elektrické, signálové, ale i konstrukční parametry. Také z tohoto důvodu byla celá konstrukce opatřena otočnými kolečky, (viz obr. 4-43). Předpokládaná váha sestrojeného eliminátoru je cca 150 kg a to bez přístrojového vybavení. Pro manipulaci s eliminátorem jsou tedy kolečka nutností. Bylo usouzeno, že testy a měření eliminátoru budou probíhat po dobu několika týdnů. Takto dlouhý časový úsek vyžaduje při každém ukončení měřicího dne uzavření transformátoru a tedy nutnost eliminátorem od transformátoru odjíždět, aby transformátor po dobu absence obsluhy mohl být uzavřen svým běžným krytem.





obr. 4-40 Nosný rám opatřený kolečky



obr. 4-41 Rám nastrojen dělicí polorovinou

Na obr. 4-42 je vyfocena první montáž dělicí poloroviny na nosný rám celé konstrukce. K tomuto účelu byl vytvořen jednoduchý přípravek, který tvoří dřevotřískové klíny (patrné ve spodní části obr. 4-41 a obr. 4-44). Díky těmto klínům je možné polorovinu umístit přesně do výšky, kde končí patka transformátoru a začíná otvor po otevření krytu transformátoru.



obr. 4-42 Dělicí polorovina přišroubovaná ke konstrukci rámu



obr. 4-43 Zajištění výšky poloroviny

Po umístění a pevnému spojení poloroviny a nosného rámu byla polorovina rozdělena podle výkresu (viz obr. 4-35) na půlku a byly na ni zakresleny všechny osy důležité pro rozmístění reproduktorů a reproboxů samotných. Na obr. 4-44 je dále vidět klín, jenž je vodičkem při umísťování poloroviny na nosný rám a dále také jeden ze šroubových spojů. Vpravo na obr. 4-45 je vidět následné sejmutí poloroviny a její horizontální příprava na další operace. A to jak zhotovení otvorů pro ozvučnice samotné, tak vyvrtání dalších nezbytných otvorů pro spojení reproboxů s polorovinou atd. Manipulace s každým komponentem byla velice náročná z důvodů rozměrových požadavků a hmotnosti jednotlivých prvků.



obr. 4-44 Dělicí polorovina spojená šrouby ke konstrukci rámu



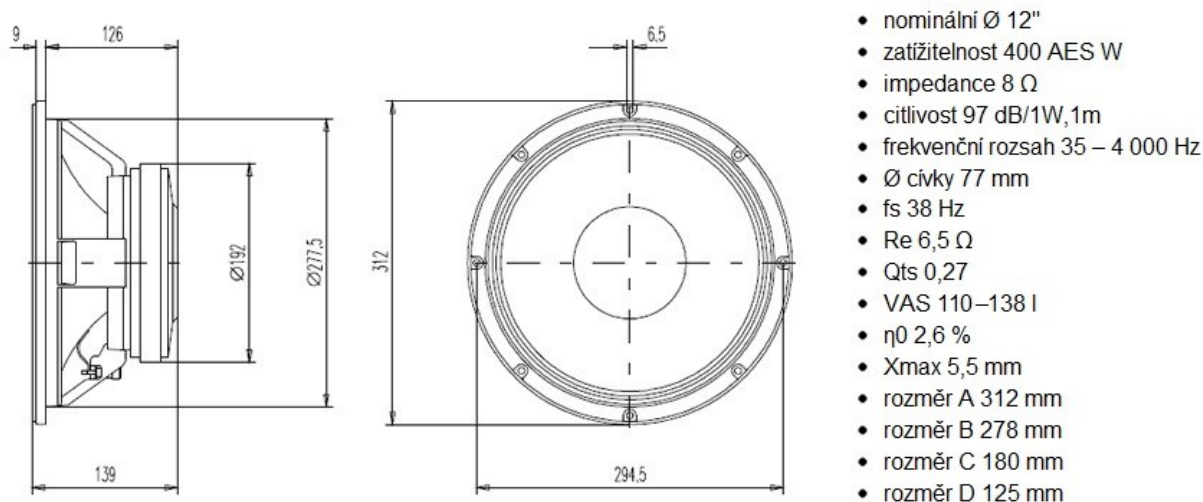
obr. 4-45 Dělicí polorovina připravená pro zhotovení otvorů pro reproduktory

Důležitým okamžikem celé konstrukce bylo umístění reproduktorů. Již samotná volba reproduktorů byla nelehkým úkolem. Z testů prováděných na modelu již bylo známo, že rozměr reproduktoru hraje velkou roli, protože velikost vlnoplochy vyzářené reproduktorem je pro akustický zkrat v nízkých frekvencích zásadní. Bylo jasné, že kvůli akustickému tlaku bude použit profesionální reproduktor se schopností velké výchylky membrány, ale rozměr a také počet byl velice zvažován.

Pro pokrytí co největší plochy protifázovými vlnami existovaly dvě možnosti. Zvolit menší reproduktory ve větším počtu, nebo větší reproduktory v menším počtu. Vzhledem k nízké frekvenci bylo přistoupeno k většímu rozměru reproduktoru.

Po zvážení všech kritérií a také s přihlédnutím k nutnosti umístit do konstrukce eliminátoru ještě přípravek s mikrofonom, bylo přistoupeno k variantě 12ti palcových reproduktorů s tím, že bude celá

konstrukce uzpůsobena tak, že bude možné kdykoliv v průběhu testů a měření možno konstrukci upravit směrem k větším rozměrům reproduktorů. Byl tedy zvolen reproduktor Beyma SM 112/N o těchto parametrech a rozměrech:



obr. 4-46 Rozměrový výkres vybraného reproduktoru [11]



obr. 4-47 Reproduktor vsazený do dělicí poloroviny



Po výběru vhodného reproduktoru a jeho umístění do dělicí poloroviny bylo započato s výrobou reproboxu (ozvučnic). Jejich úlohou je v našem případě výhradně zabránit šíření eliminátorem vytvořených akustických vln do míst, kde by tyto vlny samy tvořily hlukovou zátěž. Díky membráně basového (hluboko-tónového) reproduktoru vzniká totiž uvnitř ozvučnice tlak, ten je stejný na obou stranách membrány, ovšem z přední strany se tlak uvolňuje do prostoru. Naopak tlak ze zadní strany membrány směřuje směrem do ozvučnice, kde stlačuje poměrně malý objem vzduchu. Proto musí být stěny reproboxu dostatečně pevné a utlumené, aby vzniklé tlaky dokázaly zachytit a vytvořit dostatečný akustický odpor. Jinak mohou vzniknout rezonance, při kterých se značná část vyzařovací energie spotřebovává a klesá tak účinnost při nízkých frekvencích. Teoreticky reprobox žádnou akustickou energii nevyrábí a nesmí ji ani pohlcovat. Reprobox by měl hrát tak jako samotná membrána reproduktoru. Ve skutečnosti žádného absolutního zatlumení stěn reproboxu dosáhnout nelze. I při pečlivé konstrukci pocítíme nepatrné chvění při přenosu nízkých kmitočtů. Nesmíme však dopustit, aby chvění přední či zadní - nejvíce namáhané stěny - způsobovalo parazitní zvuky a tím zkreslení



obr. 4-48 Ozvučnice se zapuštěnou týlní stranou z důvodu snížení objemu reproboxu

U reproduktorů, u kterých dochází k relativně velkým výchylkám membrány (basové a středové reproduktory) je zapotřebí, aby měla reproduktorová skříň určitý objem, který vychází z tzv. ekvivalentního objemu označeného  $V_{AS}$ . Tento objem se počítá ze vztahu (r. 4-1). Většina výrobců ekvivalentní objemy u reproduktorů již udává a není jej tedy třeba vypočítávat.

$$V_{as} = C_{ms} C_0^2 \delta S_d^2 \quad (m^3) \quad (r. 4-1) [40]$$

- $C_{ms}$  - mechanická poddajnost (udává výrobce)
- $C_0$  - rychlost šíření zvuku
- $S_d$  - plocha membrány
- $\delta$  - hustota vzduchu ( $kg \cdot m^{-3}$ )

Vybraný reproduktor Beyma SM 112/N má doporučený objem reproboxu (ozvučnice) 110 až 138l. Objem byl tedy vypočítán, bylo ale nutné určit rozměry reprobox tak, aby v něm mohl být usazen jak 12ti palcový reproduktor, tak v případě potřeby až 18ti palcový reproduktor. Reprobox byl tedy záměrně vyroben větších rozměrů a jen pomocí posunutí záďové plochy reproboxu do vnitřní prostory bylo dosaženo požadovanému objemu 120 l. V případě, že by 12ti palcový reproduktor nestačil pokrýt vyzařováním velké těleso výkonového transformátoru, byla by zadní deska ozvučnice posunuta a tím by vznikl uvnitř reproboxu prostor dosahující přes 180l. Takto zvětšený reprobox by bez problémů stačil pokrýt nároky 18“ palcového reproduktoru, co se týče objemu. Po dokončení konstrukce reproboxů byly vyvrtány otvory pro konektorové misky a také pro uchycení ozvučnic k dělicí polorovině. Tyto úkony byly posledními, jenž vyžadovaly dělení materiálu a způsobovaly nečistoty.



obr. 4-49 Ozvučnice s otvorem pro konektorovou misku

Následující práce již požadovaly dokončení všech třískových operací, protože byly reproboxy náležitě tmeleny a vybavovány tlumením, které již nesmí být znečištěno. Reproboxy budou tvořit neprodyšně uzavřené ozvučnice, proto byly všechny strany reproboxů přetmeleny silikonovým tmelem (viz obr. 4-50). Takto bude následně přetmelená také konektorová miska a hlavně spoje, které



vzniknou stykem reproboxů, poloroviny a reproduktorů. Všechny tyto spoje budou precizně přetmeleny.

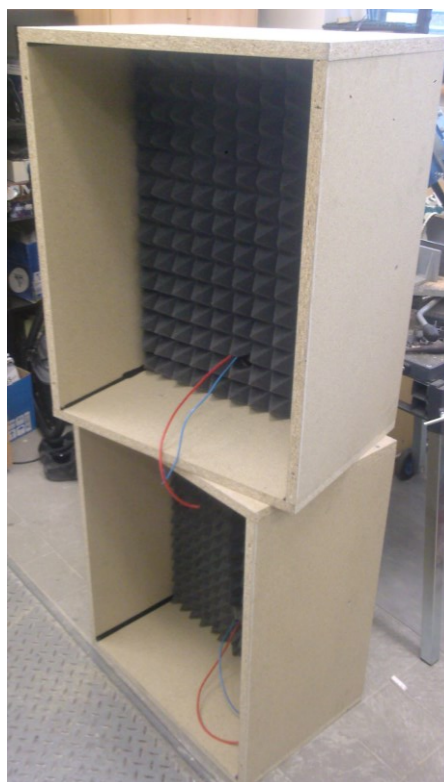
Vnitřní stěny skříně musí být vhodně zatlumeny, aby se tím zamezilo vzniku stojatých vln. Ty vznikají takto:

Zvuková vlna ze zadní strany membrány basového reproduktoru narazí na zadní stěnu ozvučnice, odrazí se a narazí na zadní stranu membrány. Čím dokonaleji je zadní stěna utlumena, tím menší je energie odražené vlny, která na membráně způsobuje interference. Odražené vlny způsobují interference na kmitočtech, které mají délku vlny srovnatelnou s rozměry reproduktorové skříně. To se projeví v této kmitočtové oblasti velkými výkyvy vyzářeného výkonu.

U beden do 100 l se tlumení provádí pomocí skládané bavlněné vaty, nebo syntetických tlumících roun (buničin). Dá se použít také buničitá vata. Vlnitá lepenka a pěnový polyuretan mají minimální tlumící účinek, proto se nepoužívají. Největší účinek mají skelné nebo čedičové vaty, ty jsou ale používány jen u průmyslové výroby z důvodu náročné manipulace. Při tlumení se po celé ploše zadní stěny přes lepenkovou podložku připevní tenkými hřebíčky bavlněná vata o tloušťce asi 5cm. To samé proveďte i na bočních stěnách, kde stačí vrstva vaty asi 3 cm. [12] Takto zní návod z literatury zabývající se stavbou reproboxů.



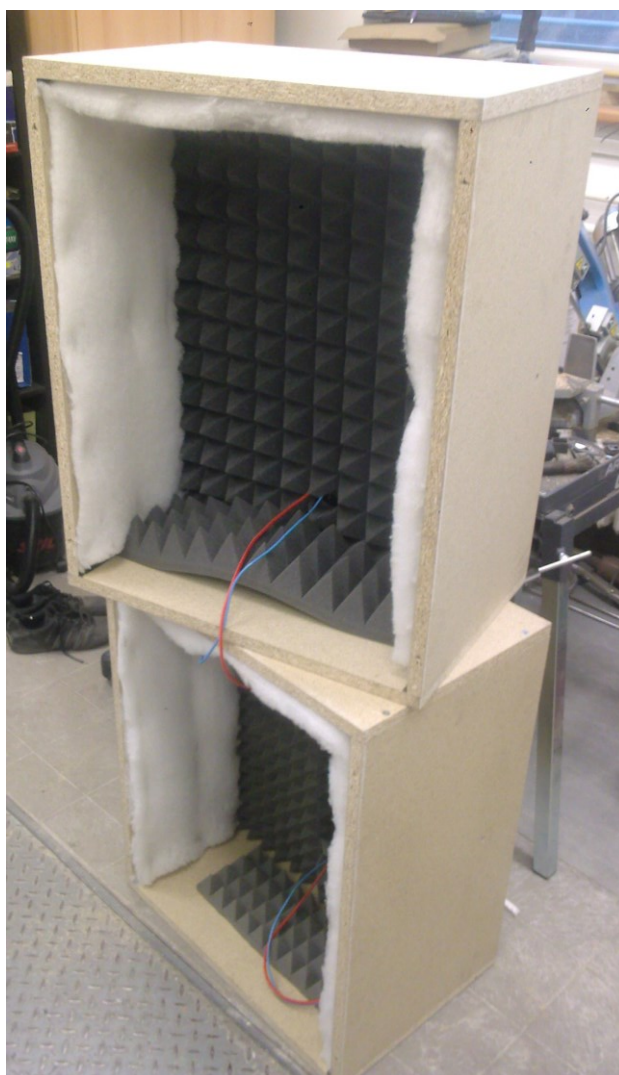
obr. 4-50 Reproboxy vytmelené silikonovým tmelem



obr. 4-51 Reproboxy osazené akustickými panely  
zabraňující stojatému vlnění

U větších skříní nad 100l se používají kmitací panely. Takové skříně již při výrobě vyztužíme na všech vnitřních hranách (3÷4)cm hranoly (dle velikosti skříně), kterými přepažíme i plochy velkých stěn. Na tyto hranoly se připevní hobrové desky (10÷15) mm (nejvhodnější je měkká hobra) tak, aby vzduchový polštář pod nimi byl utěsněný. Poddajností těchto zvukových polštářů vzniká velmi dobré tlumení stojatých vln, což přispívá ke kvalitnímu přenosu hlubokých tónů. U přední stěny se tato úprava neprovádí. [12]

Postup s využitím hobrové desky v našem případě nebude využit, ale zkušenosti z praktických staveb reproboxů napomohly k vytvoření ideálních vnitřních povrchů, které byly schopny minimalizovat možnost vzniku stojatého vlnění.



obr. 4-52 Reproboxy osazené akustickými panely a syntetickou buničinou zabraňující stojatému vlnění

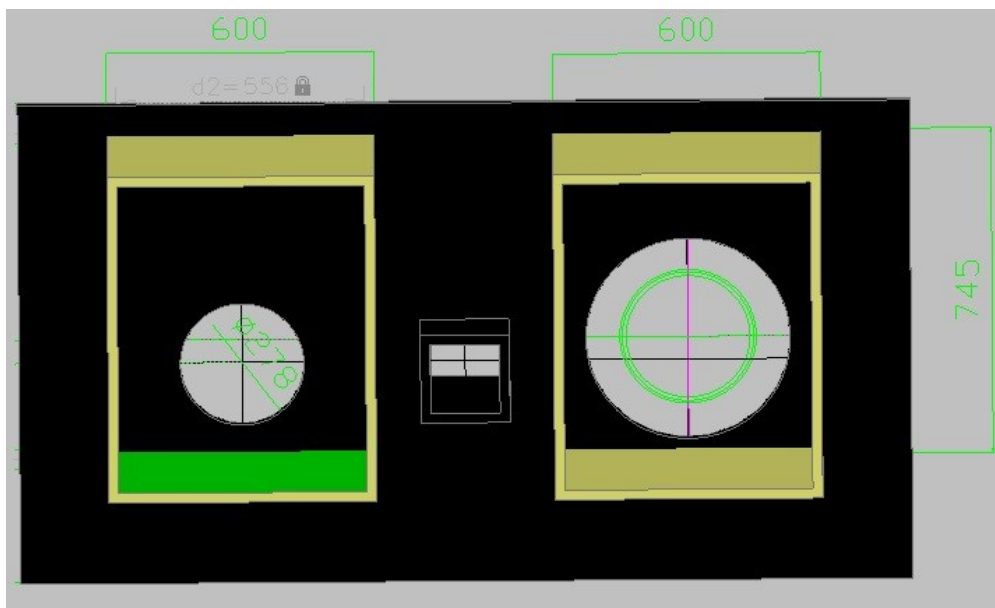
Námi vyrobené reproboxy o obsahu 120l jsou vytlumeny kombinací obou dvou předchozích postupů. Reprobox není natolik velký, aby vyžadoval speciální tlumení na všech svých vnitřních stěnách. Zadní a spodní stěny byly pokryty speciálními tlumícími panely Basotec a boční stěny byly pokryty syntetickou buničinou. Z obr. 4-51 a obr. 4-52 je postup tlumení vidět. Reprobox je v tuto chvíli osazený konektorovou miskou, ke které byly připájeny měděné kabely o průměru 2.5mm, aby nedocházelo k žádným signálovým ztrátám. Takto zhotovený reprobox je připravený k montáži na dělicí polorovinu. V polorovině i reproboxu jsou již předvrtány otvory pro vzájemné spojení provedené pomocí speciálních vrutů s inbusovou hlavou tzv. „Konfirmátů“.



obr. 4-53 Dělicí polorovina připevněná k ozvučnicím

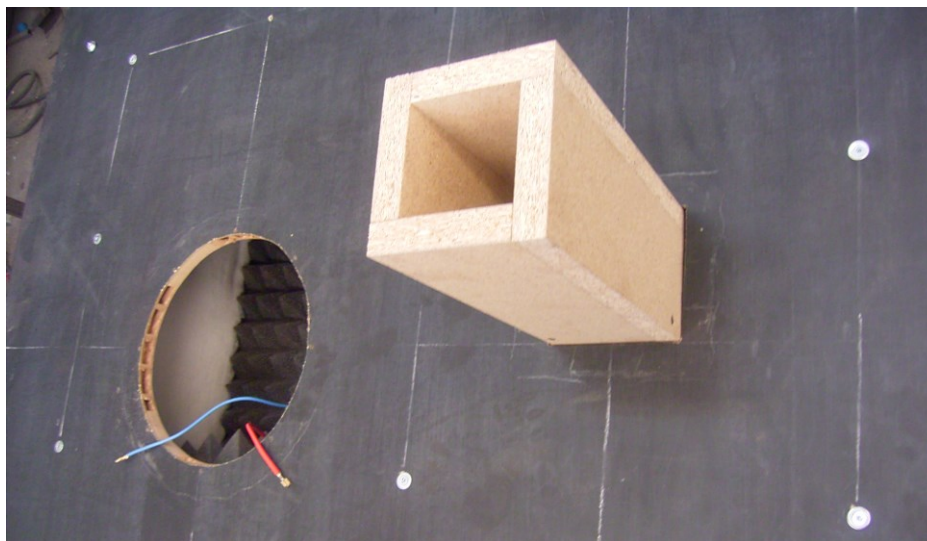
Dělicí polorovina prozatím bez reproduktorů byla pevně spojena s reproboxy. Všechny vzniklé spoje byly opět náležitě přetmeleny. Vzniklo tak samotné vyzařovací těleso, které bude následně namontováno na nosný rám. Ten zajistí vertikální stabilitu a zároveň umožní horizontální pohyb. Na obr. 4-53 je již vidět celek skládající se z ozvučnic a dělicí poloroviny, které jsou již k sobě pevně připevněny. Ozvučnice jsou kompletně utěsněny a vytlumeny a celek bude po montáži přípravku na uchycení mikrofону připraven na montáž reproduktorů.

Přípravek pro uchycení mikrofónů je patrný z obr. 4-55 a obr. 4-56. Na obr. 4-54 je 3D návrh modelu včetně přípravku uchycení mikrofónu. Na modelu je viditelné testování rozdílných rozměrů pro reproduktory 12ti a 18ti palcového průměru. Mezi nimi je uložen tubus pro mikrofón, který pokračuje až do vzdálenosti 20 cm před dělicí polorovinu. V této oblasti je počítáno s působením protifázového akustického zkratu, protože zde by měla být také umístěna membrána přijímacího mikrofónu. Tubus tedy protíná polorovinu skrz a z každé strany je zamýšlen dvacet centimetrový přesah.



obr. 4-54 3D model dělicí poloroviny, ozvučnic a otvorů pro reproduktory a mikrofon

Na obr. 4-55 je vidět zhotovený tubus, který je již vložený do poloroviny. Tubus byl připraven tak, aby do něj bylo možné pohodlně vkládat mikrofon. Protože se jedná o prototyp i tentokrát je tubus zhotoven universálně. Je sice zhotoven přesně na míru námi zvoleného mikrofonu Sennheiser MKH 416, což je také patrné z obr. 4-56, kde je již tento mikrofon vložen, ale konstrukce je zároveň přizpůsobená pro jednoduché vytažení z poloroviny a případnou záměnu typu mikrofonu.

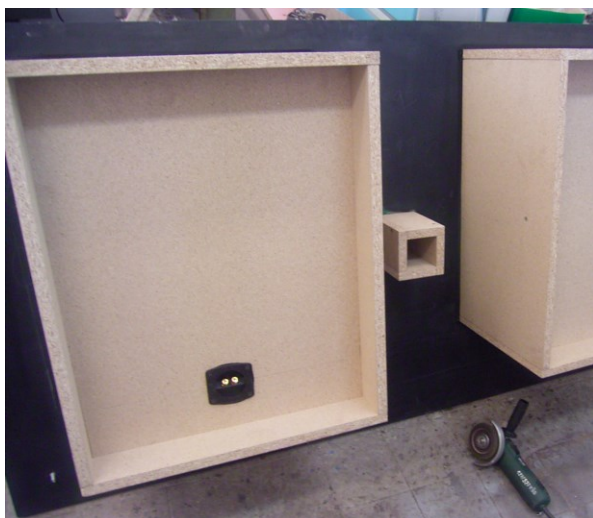


obr. 4-55 Dělicí polorovina do níž je již vložen tubus pro mikrofon





obr. 4-56 Tubus v němž je vložen mikrofon



obr. 4-57 Zadní část zhotovené poloroviny, na níž jsou vidět reproboxy a tubus pro mikrofon



obr. 4-58 Přední část zhotovené poloroviny

#### 4.5.4 Umístění Protifázového eliminátoru

Na obr. 4-59 je vidět transformátorovna budovy G, v níž je umístěn námi vybraný transformátor T616, na kterém budou prováděny testy prototypu. Je vidět čelní pohled na transformátor a také přívodní kabelová vedení vysokého napětí 10kV.



obr. 4-59 Transformátorová statice a T616



obr. 4-60 Prototyp sestavený u čelní strany T616

Prototyp byl sestaven v této čelní části transformátoru, ale následně byl převezen již ve smontovaném stavu na týlní stranu transformátoru (viz obr. 4-61). Zde byl model převezen z důvodu bezpečnosti. Bylo usouzeno, že z čelní strany jsou proudové sběrnice a kabelová vedení příliš blízko prototypu a také že umístování mikrofону z této strany je nebezpečné. S celým prototypem bylo během testů mnohokrát manipulováno a neustále byly měněny vzdálenosti jednotlivých prvků systému vůči sobě, proto bylo nutné dodržovat maximální bezpečnost.



obr. 4-61 Prototyp umístěný u NN strany transformátoru, připraven na zapojení



## 4.6 Zapojení prototypu Protifázového eliminátoru

Během testování Protifázového eliminátoru bylo experimentálně provedeno několik druhů zapojení. Snahou bylo potvrdit funkci Protifázového eliminátoru v praxi. Jednotlivé typy zapojení byly postupně kombinovány a následně měřeny.

### 4.6.1 Seznam použitých přístrojů

Než přejdeme k popisu samotných zapojení, vyčteme zde přístroje, které byly pro jednotlivé typy zapojení použity. I když jsou mnohá zařízení známá, popis těchto zařízení je nutný vzhledem k další orientaci ve schématech zapojení. Zařízení se v jednotlivých zapojeních kombinují. Oproti protifázovému modelu, bylo použito mnohem sofistikovanějších prvků, i když princip zůstává zachován.

#### Frekvenční generátor

Jedná se o generátor libovolných signálů Rigol DG 3121A. Jednokanálový programovatelný generátor funkcí s šířkou pásma 1 $\mu$ Hz...120MHz, 100MHz a 60MHz. Tento generátor využívá přímé digitální syntézy (DDS), snižující zkreslení a šum výstupního signálu. Vzorkování 300MS $\cdot$ s<sup>-1</sup> a rozlišení D/A převodníku 14 bitů. Hloubka paměti 1M bodů. V našem případě plnil funkci generování nosných hlukových frekvencí transformátoru.



obr. 4-62 Generátor libovolných signálů Rigol DG 3121A [14]

#### A/D a D/A převodník

Jako A/D a D/A převodník akustického signálu přijatého mikrofony byla zvolena profesionální zvuková karta M-Audio FastTrack Pro. Tato karta slouží v systému jako A/D a D/A převodník okamžitých FFT analýz a poskytuje vstupní signál pro software ProTools, který provádí záznamy zvuku pro následnou analýzu a také daný signál otáčí do protifáze. K této kartě jsou tedy využívány softwary Protools a SIA SmartLive.

M-Audio Fast Track Pro je USB audio rozhraní podporující rozlišení až 24 bit/96 kHz (konfigurace je ale v maximálním rozlišení omezena propustností USB 1.1 jen na 2 in nebo 2 out). Karta samotná je velice kompaktní zařízení.



obr. 4-63 Profesionální zvuková karta M-Audio FastTrack Pro.[15]

### DI Box

DI-Box (z anglického direct injection box) je zařízení sloužící k upravení nízkofrekvenčního audiosignálu různých typů (symetrický, nesymetrický) a úrovní (linková, mikrofonní, případně nějaká jiná nedefinovatelná úroveň) na dále zpracovatelnou formu (pro mixážní pult typicky symetrická, mikrofonní/linkové úrovně, pro combo obvyklá nesymetrická linka), pro převedení signálu z vysoko-impedančního na nízko-impedanční, distribuci signálu z jednoho zdroje do více zařízení a vzájemné galvanické oddělení (izolování) těchto zařízení. V našem případě byl použit DI Box společnosti ART s označením Di Box Dual Z Direct, který je vybaven spínačem pro otočení fáze. Primárně nebyl tedy použit jako oddělovač, ale pro úpravu fáze vstupního signálu. Vstupní část obsahuje spínaný (případně plynule regulovatelný) útlumový článek, oddělovací zesilovač (u jednodušších konstrukcí pouze emitorový sledovač), oddělovací člen (transformátor, optron), výstupní symetrický zesilovač a obvod fantomového napájení (zdroj +48V).



obr. 4-64 DI Box ART Dual Z Direct [16]

### Digitální USB osciloskop

Díky tomuto 4kanálovému USB osciloskopu bylo možné sledovat fázi a její následné otočení ve čtyřech bodech systému. Přičemž dva body byly využity pro komunikaci mezi mikrofonem a zesilovačem a zbývající dva mezi reproduktory. Porovnáváním signálové fáze mezi jednotlivými komponenty docházelo ke zpoždovací kontrole jednotlivých prvků v systému.

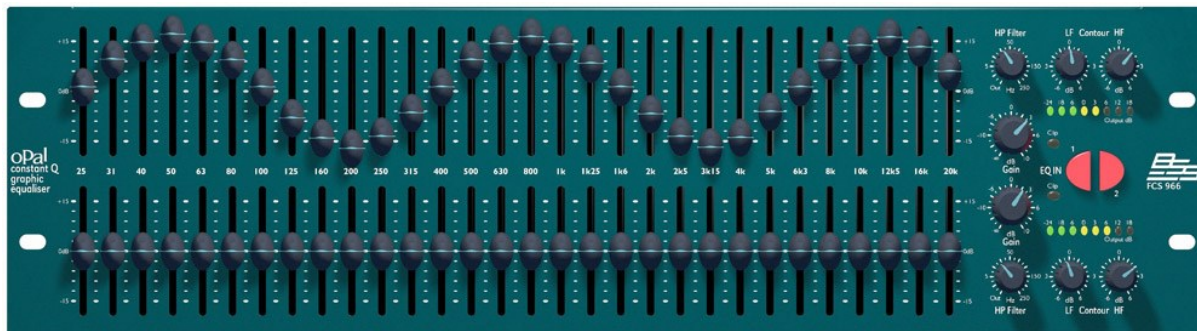


obr. 4-65 4kanálový USB Osciloskop Hantek DSO 3064[17]

### Třetino-oktávový grafický ekvalizér

Ekvalizér je zařízení sloužící k úpravám frekvenční charakteristiky zvukového signálu zesílením či potlačením některých částí akustického spektra, tedy tzv. pásem. Může být realizován i jako softwarový algoritmus v digitálním systému, ve kterém je zvuk zpracováván.

Přístroj je osazen tahovými potenciometry. Tyto jsou umístěny vedle sebe tak, že jejich polohy určují body pomyslného grafu frekvenční charakteristiky. Každý potenciometr je přiřazen k jednomu pásmu (tedy frekvenční oblasti okolo své centrální frekvence), které je nastaveno tak, že součet všech pásem pokryje celé akustické pásmo. Při zakreslení do grafu s osou kmitočtů s logaritmickým měřítkem by měla být všechna pásma zhruba stejně velká.



obr. 4-66 Třetino-oktávový grafický ekvalizér [18]

## Zesilovače

V první fázi měření byl používán zesilovač BV Audio. Tento zesilovač není zcela lineární a je to analogový přístroj. Bylo počítáno s případnou korekcí jeho nelinearity, protože byla známa. Pro jeho použití hovořil výkon, který je stabilní a je možný na základě masivního toroidního transformátoru, jež zesilovač obsahuje.

Technické parametry:

tab. 4-1 Základní technické parametry zesilovače BV Audio

Výstupní výkon	2x1000W RMS / 4Ω , 2x600W RMS / 8Ω
Kmitočt. rozsah	35Hz ÷ 22kHz / +0dB -1dB /
Citlivost	1,5V
Zkreslení	max 0.05% / 900W / 1kHz
Rychlost průběhu	60V / μs (bez VF filtru)



obr. 4-67 Zesilovač BV Audio [19]

Při měření s tímto zesilovačem se projevovalo drobné zpoždění, které způsobovalo nepříjemné rozcházení fáze. Proto byl v druhé fázi měření použit digitální zesilovač Digam 3000. Digitální zesilovač, výkonové zesilovače, koncové zesilovače

Zesilovače třídy digital v sobě spojují několik klíčových výhod, jež je nadřazují konvenčním zesilovačům pracujícím ve třídě analog. Všechny přednosti vycházejí z nejdůležitější vlastnosti PWM technologie, jíž je vysoká účinnost (teoreticky 100%, v praxi okolo 95%). Díky ní je elektrická energie

v maximální míře využita pro zesílení zvuku jen se zanedbatelnou produkcí odpadního tepla. Digitální zesilovače si vystačí s mnohem menšími chladiči a jako zdroj napájecího napětí potřebují transformátor s minimálními rozměry. Jsou tedy menší a současně mají podstatně nižší hmotnost.

Technické parametry:

tab. 4-2 Základní technické parametry digitálního zesilovače Digam 5000

Výstupní výkon	1360 W / 4Ω - 750 W / 8Ω
Kmitočet. rozsah	Plný rozsah
Citlivost	1,1V
Zkreslení	max 0.1% / plný výkon / 1kHz
Rychlost průběhu	50V/μs (bez VF filtru)



obr. 4-68 Digitální zesilovač Digam [20]

## SQN jednotka

Je profesionální zvukové zařízení umožňující od modulace vstupního signálu až po invert fáze, který je v našem případě využíván. Toto kompaktní zařízení obsahuje mikrofonní předzesilovače, jež umožňují zpracovávat signál ze všech typů mikrofónů a to jak napájených, tak dynamických (nenapájených). Obrovskou výhodou tohoto zařízení je, že je napájeno bateriovým zdrojem, který zaručuje absolutní nezávislost na elektrické síti, která by mohla do zpracovávaného signálu indukovat nechtěné frekvence. Toto zařízení bylo tedy použito jako sofistikovaný invertor fáze. Jeho výhodou oproti DI Boxu byla možnost plynulé regulace signálu vstupujícího do zesilovače. Další velkou výhodou této jednotky je nezávislost na elektrické energii z místní sítě. SQN má bateriový zdroj napájení. Proto je u této jednotky nižší pravděpodobnost možného rušení signálu, způsobeného indukovaním síťového napětí na signál procházející systémem eliminátoru.

tab. 4-3 Základní technické parametry SQN jednotky

Citlivost	-78dB v maximální úrovni
Odstup signál - šum	-130dB
Maximální úroveň	-20db
Frekvenční rozsah	20Hz – 20kHz (+-1Hz)



*obr. 4-69 Portable Mix SQN A [21]*

### Oddělovací transformátor

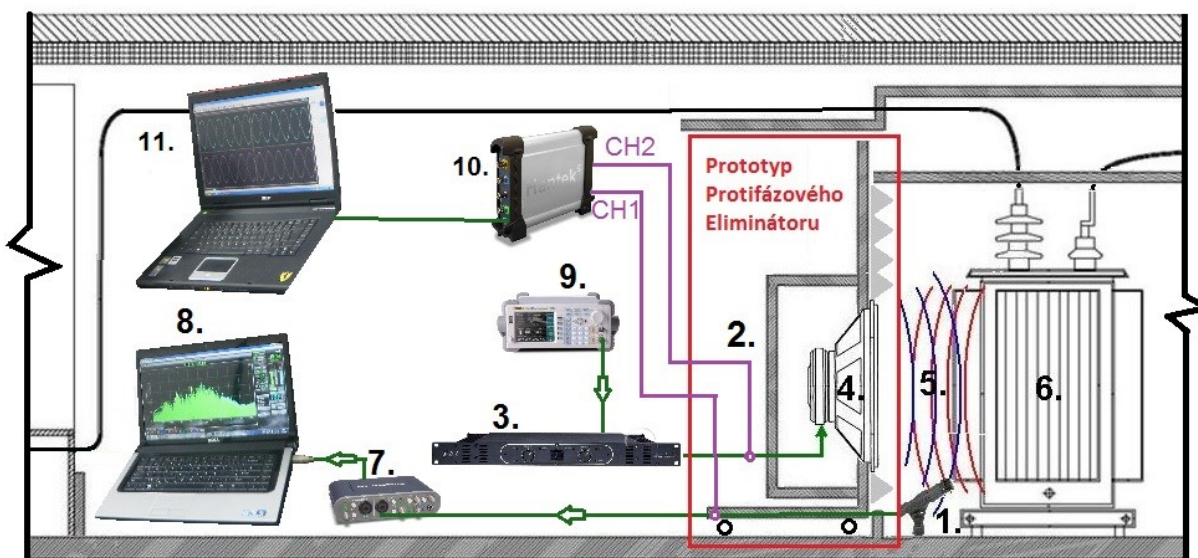
Oddělovací transformátor Diametral OT230.012 byl použit pro oddělení síťového napětí od připojeného zařízení s maximálním odběrem proudu 1,2 A. Výstup zdroje je chráněn tavnou pojistkou. Zapnutí zdroje je indikováno podsvětleným vypínačem. Výstup je proveden panelovou zásuvkou 230V. Transformátor je dostatečně dimenzován pro trvalou dodávku maximálního výkonu do zátěže.[22]

*obr. 4-70 Oddělovací transformátor Diametral OT230.012 [22]*



#### 4.6.2 Zapojení s frekvenčním generátorem

Prvním testovaným zapojením bylo nejjednodušší řešení obsahující frekvenční generátor. Při tomto zapojení se neobracela fáze samotného parazitního zvuku transformátoru, ale proti transformátoru byly vysílány nosné frekvence hluku. Za nosné frekvence hluku transformátoru byly po spektrální analýze prohlášeny násobky 100Hz. Během samotného spuštění byla prováděna okamžitá FFT analýza spektrálním analyzátozem, resp. Softwarem SIA SmartLive, která analýzu provádí v reálném čase. Jako A/D převodník, poskytující vstupní data pro software posloužila profesionální audio-karta M-Audio FastTrack Pro tak zpracovávala signál z měřicího mikrofону. Na základě aktuální FFT a CPB analýzy ze spektrálního analyzátoru byly nastavovány jednotlivé frekvence 107Hz, 204Hz atd. které byly s totožnou intenzitou vysílány proti transformátoru. Nepřesnost frekvencí viz předchozí 107Hz a 204Hz je způsobena zpracováním signálu, kdy v použité jednotce je signál v real-time módu analyzován v krátkém časovém úseku, nebo v postupných úsecích s krátkým časovým cyklem. To způsobí posunutí nosné frekvence do blízkosti nejbližšího postranního pásma. Celé zapojení je znázorněno na obr. 4-71, ze kterého je patrné, že výstupní signál z frekvenčního generátoru je zapojen do zesilovače a tento zesílený signál je rovnou distribuován do reproduktoru. Dále je zde obvod spektrálního analyzátoru a také USB osciloskop, který poskytoval informace o fázi.

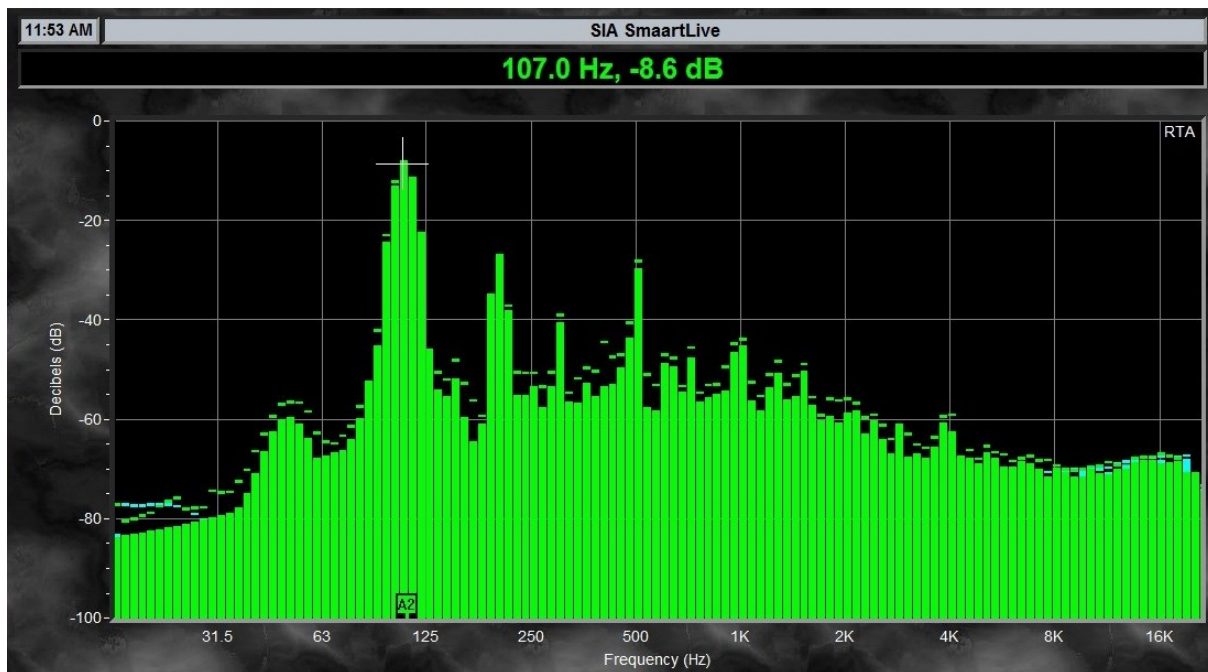


- |                                |   |                               |
|--------------------------------|---|-------------------------------|
| 1) Měřicí mikrofón             | 2) Protifázový eliminátor                 | 3) Zesilovač                  |
| 4) Reprodukter                 | 5) Akustický zkrat                        | 6) Transformátor              |
| 7) Audio – karta FastTrack Pro | 8) Pc obsahující software Sia SmartLive 5 | 9) Frekvenční generátor Rigol |
| 10) USB osciloskop             | 11) PC pro osciloskop                     |                               |

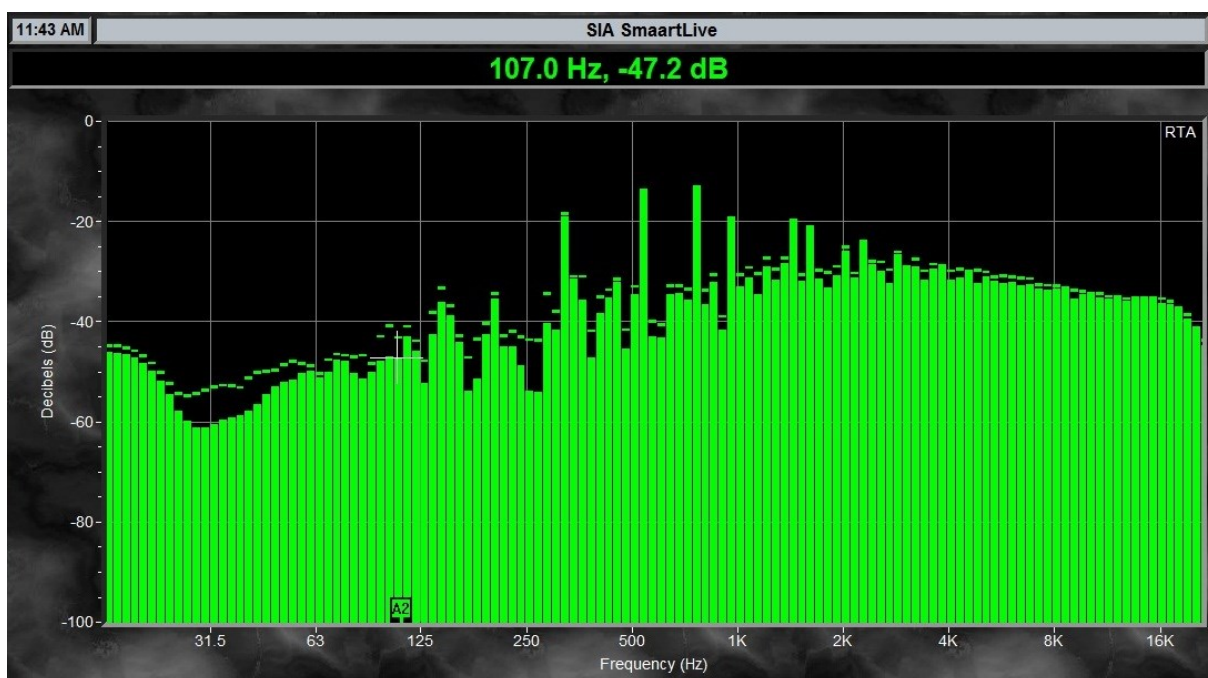
obr. 4-71 Schéma zapojení Protifázového eliminátoru s frekvenčním generátorem

Všechny obvody byly napájeny přes oddělovací transformátor, aby nedocházelo k rušení signálů. Fáze byla srovnávána pomocí frekvenčního generátoru, na kterém byla nastavená frekvence posouvána zrychlováním nebo zpomalováním. I přes snahu dosáhnout přesného sfázování, systém vykazoval známky eliminace pouze v oscilačních vlnách. To znamená, že systém samotný oscilloval a

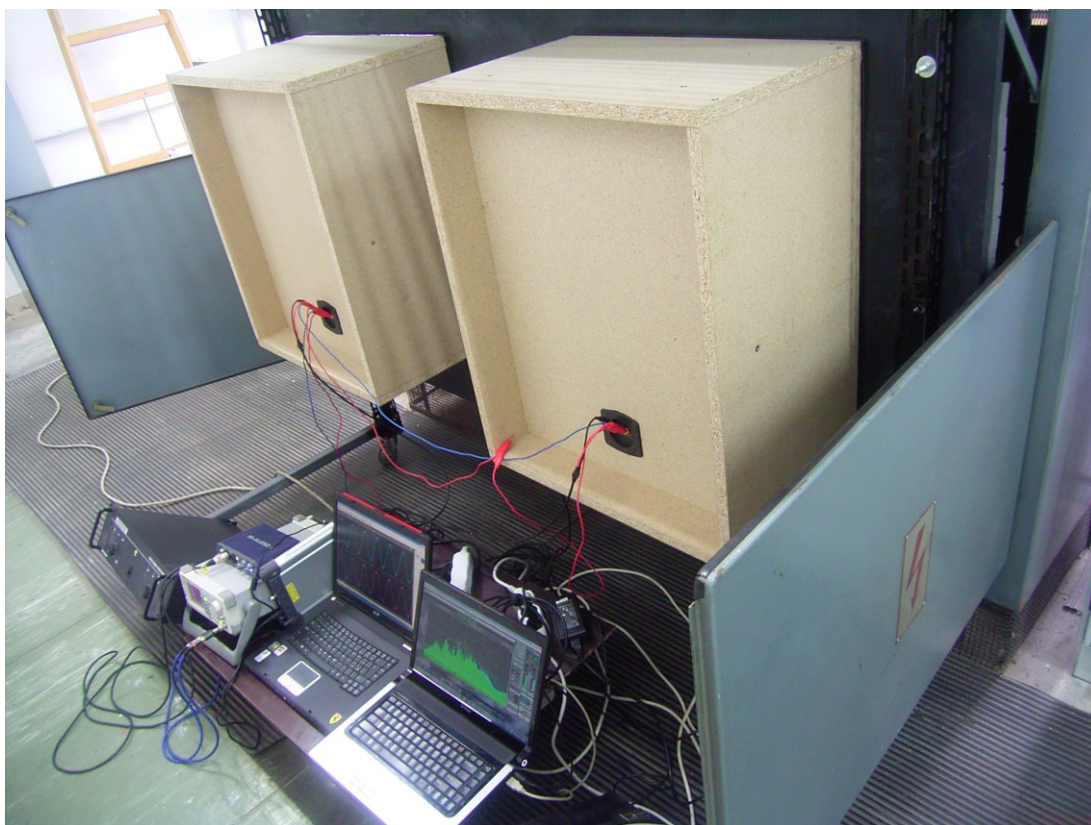
k eliminaci frekvencí docházelo rázově v určité periodě. Pokles v momentě, kdy došlo k eliminaci byl, zaznamenan pomocí spektrálního analyzátoru a je tedy patrný z obr. 4-72 a obr. 4-73, kde je na obr. 4-72 vidět nejprve frekvence 107 Hz silně vystupující nad okolní širokospektrální hluk a dále je na obr. 4-73 již patrná eliminace této frekvence o 38,6dB.



obr. 4-72 Spektrální analýza hluku transformátoru v maximu oscilace Protifázového eliminátoru



obr. 4-73 Spektrální analýza hluku transformátoru v minimu oscilace Protifázového eliminátoru

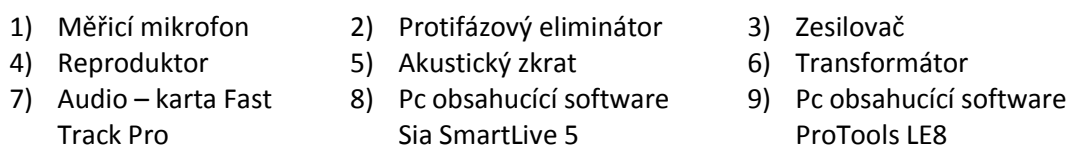


obr. 4-74 Zapojení Protifázového eliminátoru s frekvenčním generátorem

#### 4.6.3 Zapojení se software ProTools

Toto je první zapojení prototypu Protifázového eliminátoru, kde je využito aktuálního hluku transformátoru. Mikrofon sejme parazitní zvuk transformátoru. Tento přeměněný akustický tlak na elektrický signál vyšle do A/D převodníku, jež tvoří profesionální audio karta M-Audio FastTrack Pro. Tato karta vysílá přes rozhraní USB informace do audio softwaru ProTools, který je schopen v reálném čase provést zpracování signálu a pomocí jeho funkce jej otočit do protifáze a vyslat zpět do audio-karty. Ta v tomto případě zpracuje signál D/A převodníkem a vysílá analogový signál do zesilovače. Zesilovač vybudí reproduktor na potřebný akustický tlak. Reproduktor vyzáří proti transformátoru jeho vlastní hluk, otočený do protifáze. I v tomto případě dochází k oscilaci signálu. I přes použití tubusu na mikrofon a odstínění jeho tělesa docházelo v tomto případě ke zpětné vazbě mezi reproduktory a mikrofonem. Problémy se zpětnou vazbou budou eliminovány v zapojení č.3 a následně také č.4. Problém s oscilací hluku se v tomto zapojení nepodařilo vyřešit. Situace je velice podobná jako u zapojení č.1. Problém se zpětnou vazbou byl řešen přímo v softwarovém prostředí a to zařazením ekvalizéru do pomyslného softwarového řetězce. Tento ekvalizér byl velice účinný, ale rozděloval pásmo jen na tři základní pásma, vysoké, středotónové a nízké. To znamenalo, že při omezování zpětné vazby tímto ekvalizérem docházelo k nežádoucímu omezování zbytečně širokého frekvenčního spektra. Bylo tedy rozhodnuto vřadit do systému hardwarový grafický ekvalizér.





obr. 4-75 Schéma zapojení Protifázového eliminátoru se software ProTools

Při tomto zapojení je použit k otočení protifáze DI Box, který je zařízení umožňující okamžité otočení fáze na analogové bázi. V podstatě při tomto přepnutí dochází k invertu vodičů symetrického zapojení.

The diagram shows a transformer with a shield (stínění) between the primary and secondary windings. The primary winding is connected to an AC source with voltage  $U_1$  and a secondary source with voltage  $-U_1$ . The secondary winding is connected to a load with voltage  $U_2$ . The shield is grounded and has a voltage  $U_n$ . A dashed oval indicates the magnetic flux path through the shield.

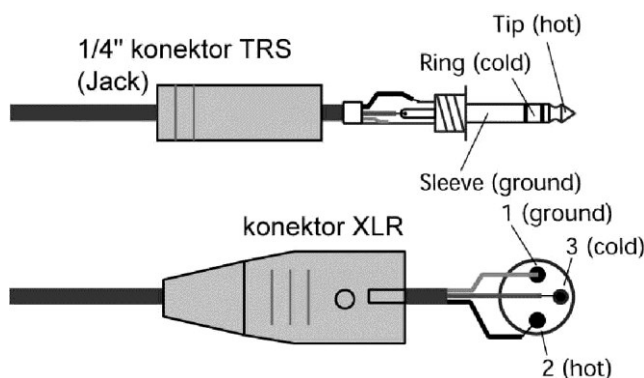
obr. 4-76 Princip symetrického vedení signálu [39]

U symetrického vedení signálu je použito 3pólové propojení zařízení. Jeden aktivní pól (hot, live) přenáší signál přímo, druhý (cold, return) má obrácenou polaritu (návrat signálu) a třetí pól (ground) má nulový potenciál. Tento typ propojení se v angličtině označuje Balanced. Jeho výhodou je hlavně odolnost proti rušivým signálům.

Napětí  $u_1$  a  $-u_1$  se odečtou na vstupním transformátoru, který je transformuje na výstupní napětí  $u_2$ . Místo transformátoru se v dnešní době používá přístrojový diferenční zesilovač s operačními zesilovači. Případné rušivé napětí  $u_n$  se indukuje do obou aktivních vodičů (hot a cold) stejnou měrou a se stejnou polaritou, takže se při odečtení napěťových potenciálů těchto vodičů na vstupu transformátoru vyruší. Pokud je převodní poměr transformátoru 1:1, platí pro napětí  $u_2$  rovnice. [39]

$$u_2 = (u_1 + u_n) - (-u_1 + u_n) = 2u_1 \quad (\text{r. 4-2}) [39]$$

K propojování se používají konektory Canon XLR (Live-Return) nebo 1/4" TRS a 2žilové stíněné kabely. Pól s nulovým potenciálem je připojen na stínění kabelu. Aktivní vodiče jsou u konektoru XLR připojeny na piny 2 a 3 a u konektoru TRS na špičku (Tip) a kroužek (Ring) konektoru, stínění na objímku (Sleeve), resp. na pin 1 u konektoru XLR (viz obr. 4-77). [39]



obr. 4-77 Zapojení konektorů pro symetrické vedení signálu [39]

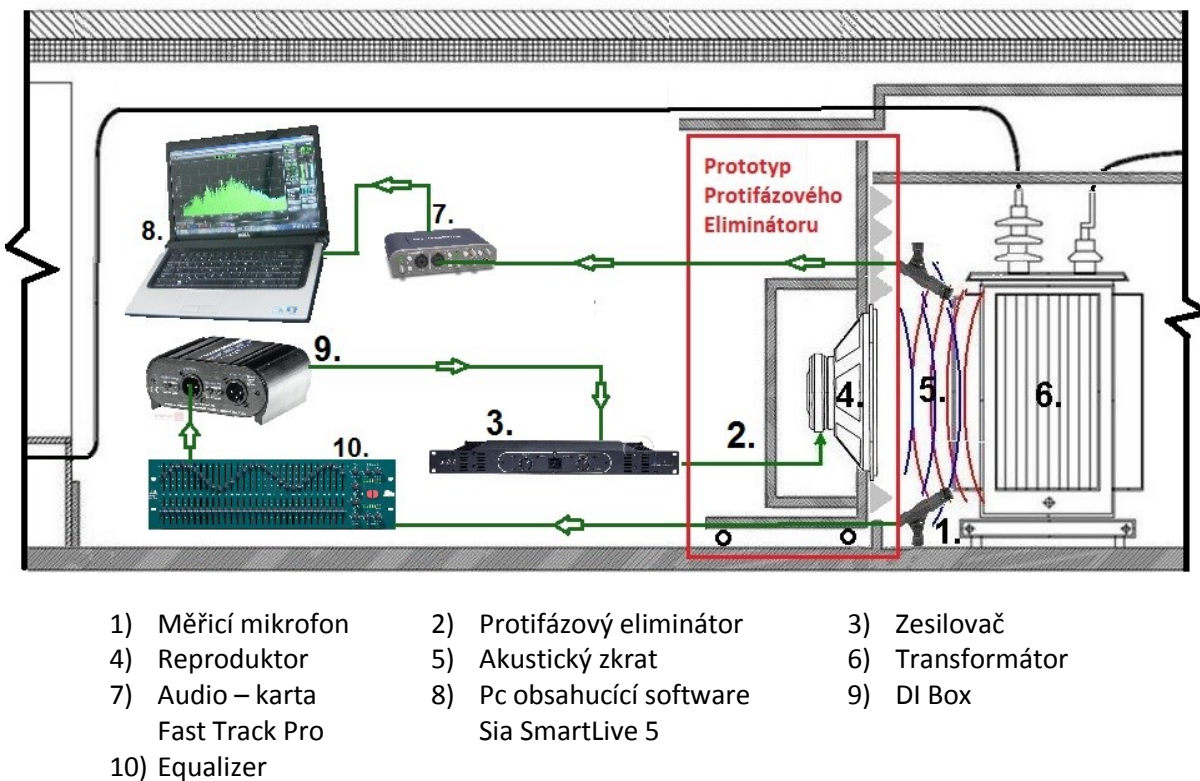
V samotném DI Boxu tedy dochází k záměně vodičů (HOT a COLD). V tomto zapojení nebylo možno použít mikrofonu Sennheiser MKH 416 z důvodu nemožnosti napájení mikrofonu. Samotný DI Box neposkytuje možnost napájení mikrofonů. Jako alternativa byl zvolen dynamický mikrofon Shure SM57. Změnou mikrofonu také ovlivňujeme tvorbu zpětné vazby. Tento mikrofon by měl být díky své nízké citlivosti méně náchylný ke zpětným vazbám.



obr. 4-78 Mikrofon Shure SM 57[18]

Tento mikrofon, oproti doposud používanému Sennheiseru MKH 416, je mikrofon pracující bez nutnosti napájení z důvodu zcela jiného principu funkce. Tento princip s sebou nese řadu výhod, ale také jednu zásadní nevýhodu a to velmi nízké výstupní napětí, které je tvořeno v podstatě jen chvěním membrány, na které je cívka, pohybující se v magnetickém poli. Tato nevýhoda se obrátila v náš

neprospěch u tohoto zapojení, protože zesilovač musel pracovat se svými maximálními hodnotami, aby byl schopen vybudit reproduktory k požadovaným hodnotám akustického tlaku okolo 80dB.



obr. 4-79 Schéma zapojení Protifázového eliminátoru s DI Boxem

Celý systém v tomto zapojení je odlišný od všech ostatních, použití jiného mikrofónu značně změnilo celkový charakter, jak po akustické tak po elektrické stránce. Akusticky se snížil odstup mezi signálem a šumem (zvýšil se šum), protože bylo nutno používat vyšších výkonů zesilovače a tím došlo k navýšení spotřeby elektrické energie celého eliminátoru. Systém je tedy zapojen následovně. Z dynamického mikrofónu (Shure SM57) jde signál do DI Boxu, kde dochází k otočení fáze příchozího mikrofónního signálu, takto zpracovaný signál pokračuje do grafického ekvalizéru, který frekvenčně eliminuje zpětnou vazbu. Takto fázově a frekvenčně upravený signál je přenesen do zesilovače, který vybudí reproduktory na potřebný akustický tlak a ten je vyslán proti hlučícímu transformátoru.

Nově byl do zapojení také vřazen grafický ekvalizér, který měl snížit riziko zpětné vazby. Při měření byla prováděna spektrální analýza probíhajících akustických jevů a ve chvíli, kdy docházelo k tzv. „nahoukávání - pískání“ systému, to znamená uzavírání zpětné vazby, byla frekvence, na které k uzavírání vazby docházelo, potlačena. Potlačena mohla být právě kvůli okamžité spektrální analýze, která ukázala, která frekvence zpětnou vazbu způsobuje. Tento systém se stal velice účinnou obranou proti zpětné vazbě a navíc poskytl další možnost, a to některé frekvence potlačovat, ale také jiné naopak zesilovat. Frekvence, způsobující zpětnou vazbu, byly grafickým ekvalizérem potlačovány a nosné hlukové frekvence byly zesilovány, aby docházelo k jejich zaostření ve spektru. Zaostřením je myšleno potlačení postranních frekvenčních pásem.



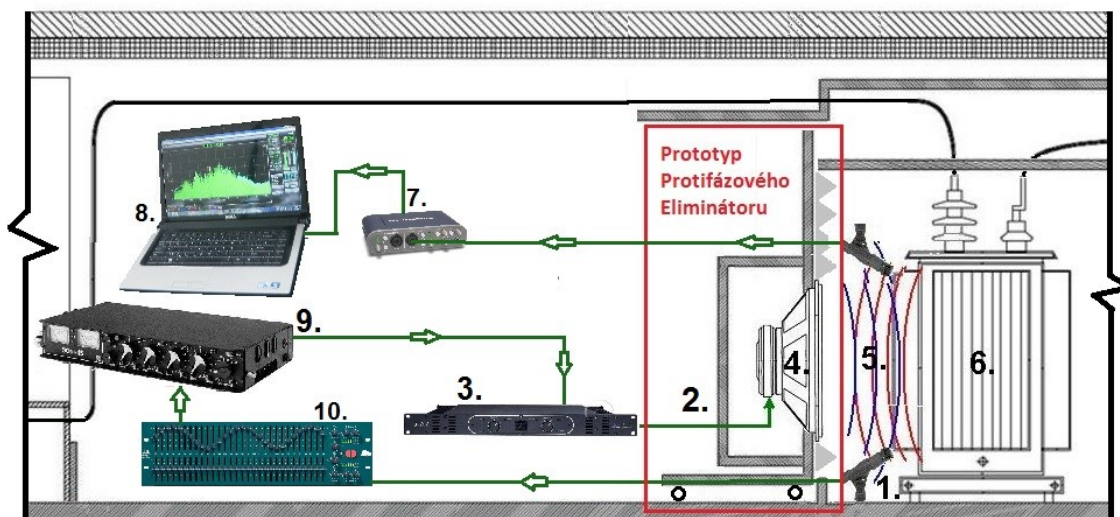


*obr. 4-80 Mikrofon opatřený ochranou proti zpětné vazbě.*

K částečné eliminaci hluku transformátoru při tomto zapojení docházelo, podařilo se také volbou jiného mikrofону a použitím grafického ekvalizéru snížit náchylnost systému ke zpětné vazbě, ale oscilační efekt byl stále přítomen a také se na hlukový signál načítal šum z eliminátoru, který byl způsobován nenapájeným dynamickým mikrofonom.

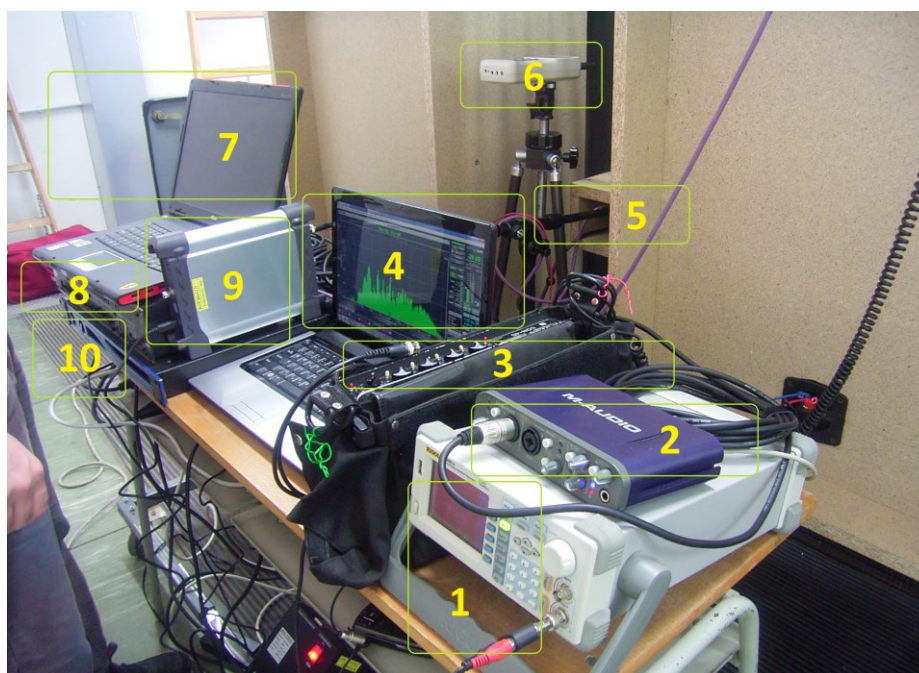
#### **4.6.5 Zapojení používající SQN jednotku**

Výsledné zapojení s SQN jednotkou je kombinací všech předchozích zapojení, ze kterých byla vyvozena patřičná opatření. U předchozích zapojení se projevovaly problémy se zpětnou vazbou a oscilací celého systému. Zpětná vazba byla potlačena použitím grafického ekvalizéru. Oscilace byla vyřešena rychlejším zesilovačem. V předchozích zapojeních byl používán výkonový zesilovač BV Audio, kdežto u tohoto zapojení byl použit digitální zesilovač Digam 5000. Další výraznou přístrojovou změnou je použití SQN jednotky místo DI Boxu. SQN jednotka je mnohem výhodnější, protože poskytuje uživateli možnost napájení mikrofону libovolného typu, to znamená, že jsme se mohli vrátit k používání úzce směrového mikrofónu Sennheiser MKH 416



- |                                    |  |                  |
|------------------------------------|--|------------------|
| 1) Měřicí mikrofón                 | 2) Protifázový eliminátor                    | 3) Zesilovač     |
| 4) Reproduktor                     | 5) Akustický zkrat                           | 6) Transformátor |
| 7) Audio – karta Fast<br>Track Pro | 8) Pc obsahující software Sia<br>SmartLive 5 | 9) SQN jednotka  |
| 10) Equalizer                      |  |                  |

obr. 4-81 Výsledné schéma zapojení Protifázového eliminátoru s SON jednotkou



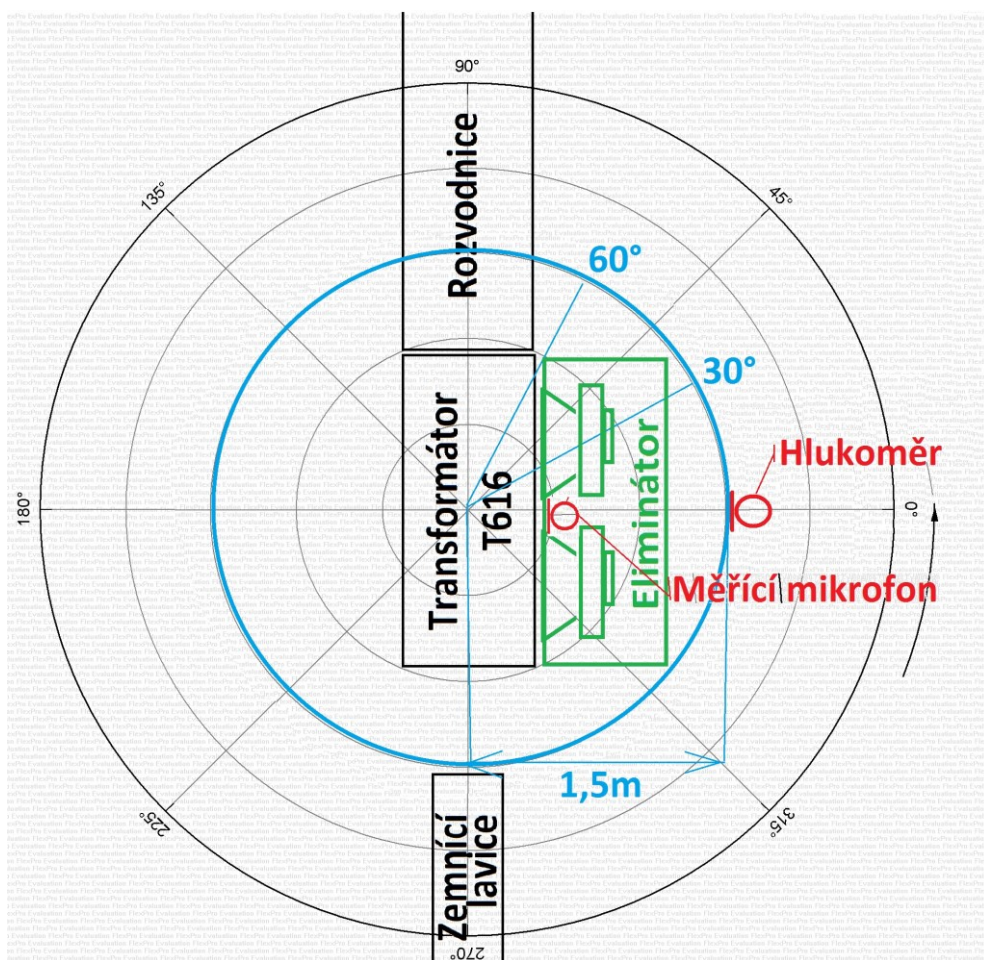
obr. 4-82 Popis zapojení Protifázového eliminátoru s SQN jednotkou

Popis Obrázku: 1- Frekvenční generátor, 2- Profesionální zvuková karta M-Audio, 3- jednotka SQN, 4- Spektrální analyzátor, 5-Měřicí mikrofon, 6-Hlukoměr, 7- PC digitálního osciloskopu, 8- grafický ekvalizér, 9- 4kanálový USB osciloskop, 10- digitální zesilovač



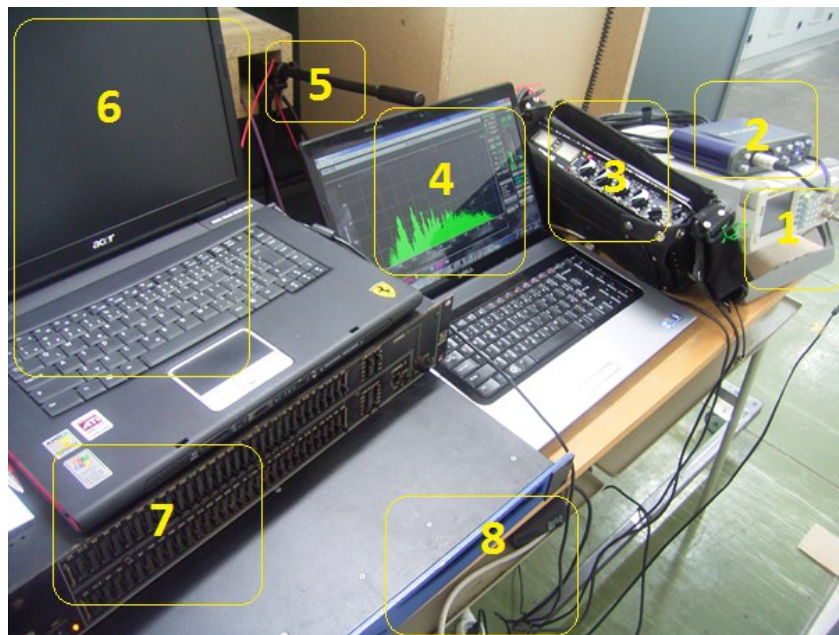
## 4.7 Měření prototypu Protifázového eliminátoru

Po nalezení výsledného zapojení mohlo být přikročeno k závěrečným testům. Měření funkčního prototypu probíhala obdobným způsobem jako u modelu. Nejdůležitější bylo zjistit pokles hladiny akustického tlaku v místnosti. Toto měření bylo zajištěno akusticky kalibrovaným hlukoměrem. Hladina byla také měřena v rámci spektrální analýzy, která byla druhým hlavním ukazatelem funkčnosti systému. Prostor kolem transformátoru byl opět vytýčen kruhovými výsečemi po  $30^\circ$ . Tentokrát již nebylo možné dodržet vzdálenost 1m od zdroje hluku, protože samotný transformátor má 2m na délku. Průměr měřicího kruhu měl tedy 3m. Měření navíc bylo velmi ztíženo v  $90^\circ$  a  $270^\circ$ , což jsou boky transformátoru. V těchto místech je z jedné strany umístěna rozvodnice a z druhé strany zemní laviice.



obr. 4-83 Schéma měření akustické účinnosti Protifázového eliminátoru

Z měření byla pořízena data, která byla následně zpracována do přehledných tabulek. Při měření hlukoměrem se pořizují vždy dvě hodnoty, min. a max., ze kterých se poté vytvořil průměr.



obr. 4-84 Popis akustických měření Protifázového eliminátoru s SQN jednotkou

Popis Obrázku: 1- Frekvenční generátor, 2- Profesionální zvuková karta M-Audio, 3- jednotka SQN, 4- Spektrální analyzátor, 5- Měřicí mikrofon, 6- PC digitálního osciloskopu, 7- grafický ekvalizér, 9- digitální zesilovač

tab. 4-4 Intenzita hluku před aktivací Protifázového eliminátoru

Úhel (°)	Minimum (dB)	Maximum (dB)	Průměr (dB)
0	70,1	71,8	70,95
30	69,9	70,3	70,1
60	69	70,8	69,9
90	68,3	71,7	70
120	69,8	70,9	70,35
150	68,9	70,9	69,9
180	69,2	70,3	69,75

tab. 4-5 Intenzita hluku po aktivaci Protifázového eliminátoru

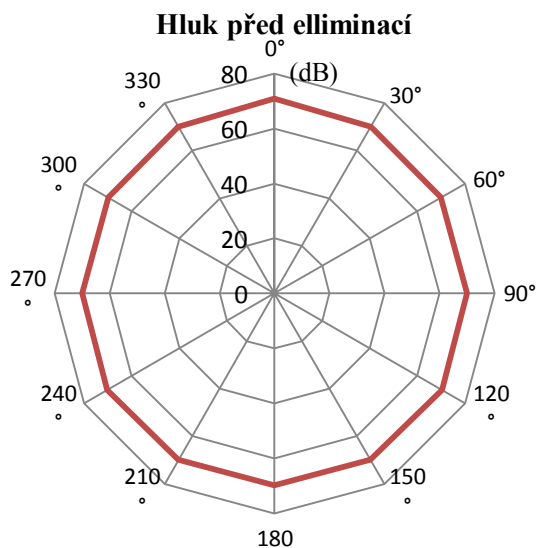
Úhel (°)	Minimum (dB)	Maximum (dB)	Průměr (dB)
0	64,3	66,1	65,2
30	64,2	66,3	65,25
60	65,5	66,8	66,15
90	67,4	68,8	68,1
120	68,9	69,2	69,05
150	69,1	70,8	69,95
180	69,5	69,9	69,7

## 4.8 Zhodnocení výsledků dosažených eliminátorem

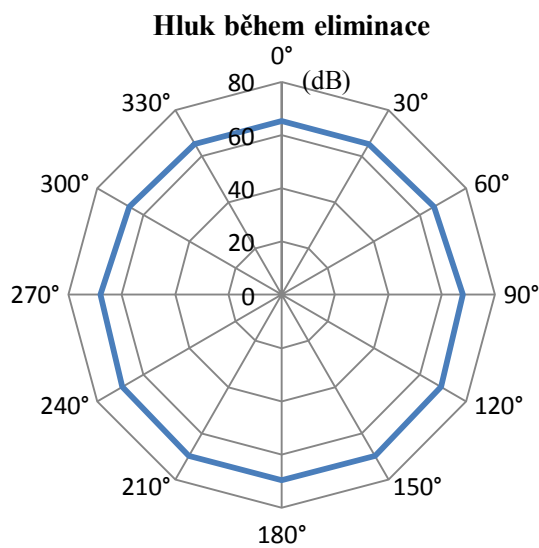
Výsledky byly zhodnoceny pomocí dvou nezávislých měřicích postupů. Jedním z nich bylo pořízení polárních diagramů hlučnosti transformátoru, před a po eliminaci a druhým pořízením spektrálních analýz před a po eliminaci. Výsledky potvrdily funkčnost zařízení v reálných podmínkách.

### 4.8.1 Výsledky zaznamenané do polárních grafů

Výsledky intenzit hluku transformátoru T616 v běžném stavu a za působení Protifázového eliminátoru byly sestaveny do polárních grafů. Tyto grafy stejně jako v případě modelu byly vytvořeny za pomoci software FlexPro. Grafy popisují situaci před působením eliminátoru a po jeho zapnutí. Liší se však v jejich podání výsledků. Grafy na obr. 4-85, obr. 4-86 a obr. 4-87 popisují eliminaci v jednotkách dB jdoucí od nuly, proto nejsou výsledky dobře patrné. Na škále od nuly do cca 70dB dochází k eliminaci v řádech jednotek decibel, navíc grafy nerespektují logaritmický nárůst osy intenzit hluku, proto je rozdíl na těchto grafech špatně znatelný. Grafy byly zpracovány vždy tak, že modrý graf ukazuje intenzitu hluku v rádiu 360° kolem transformátoru a červený graf ukazuje intenzitu hluku kolem transformátoru v totožném rádiu, ale za působení Protifázového eliminátoru.



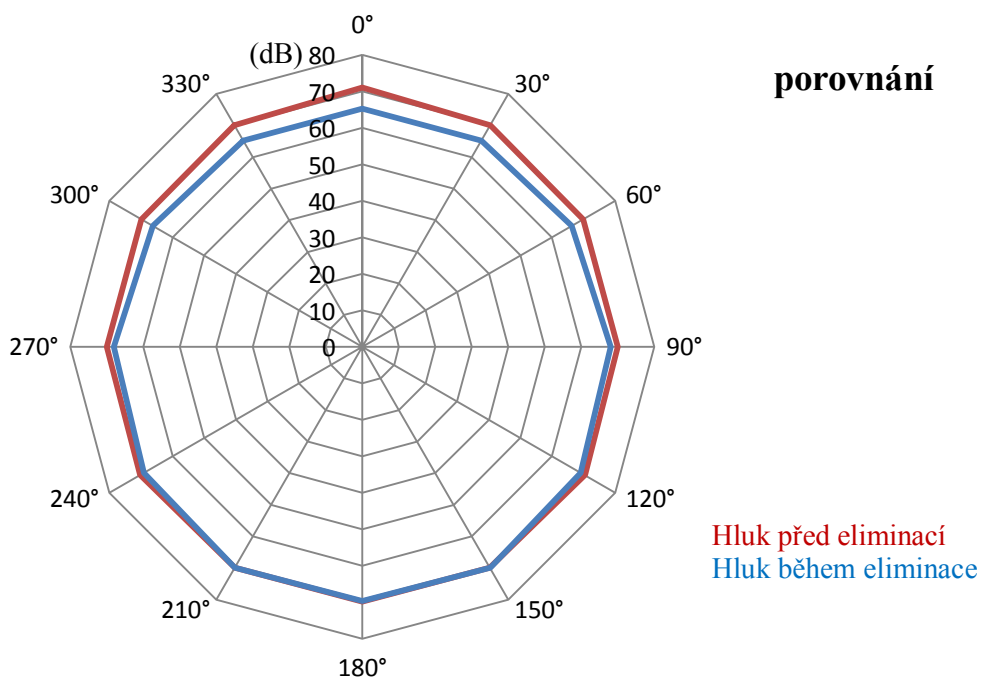
obr. 4-85 Intenzita hluku kolem transformátoru



obr. 4-86 Intenzita hluku kolem transformátoru při působení Protifázového eliminátoru.

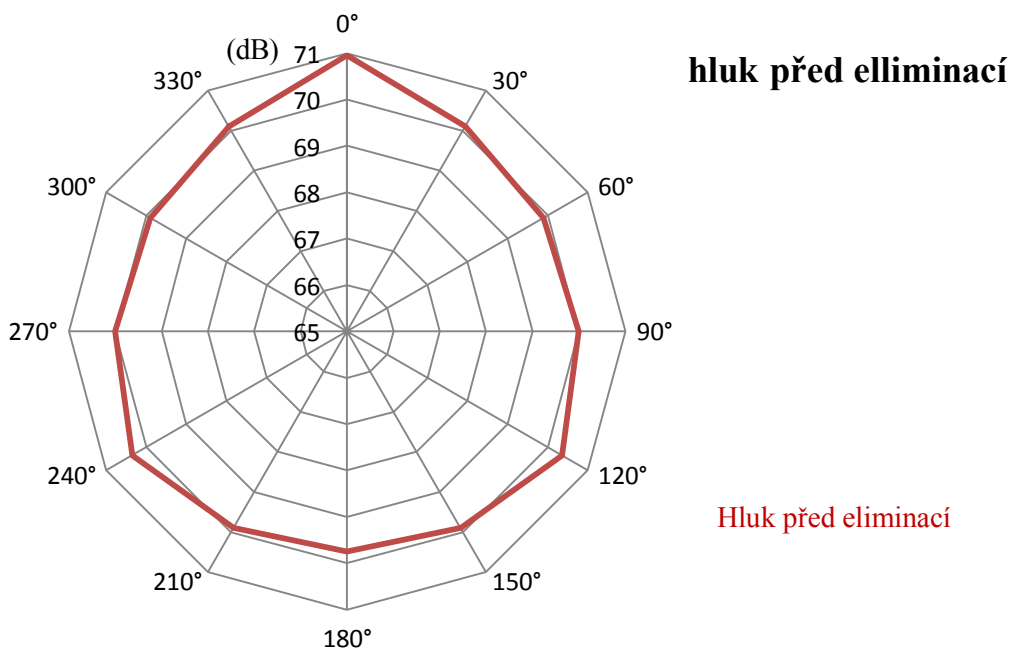
Výsledný graf představuje porovnání těchto dvou předchozích grafů při respektování předchozí barevnosti. Z porovnávacích grafů je patrná eliminace v úhlu 0° a její následné snižování účinnosti až do bodu 180°, což reprezentuje prostor druhé strany transformátoru, kde se intenzita hluku vrací do své původní hladiny.



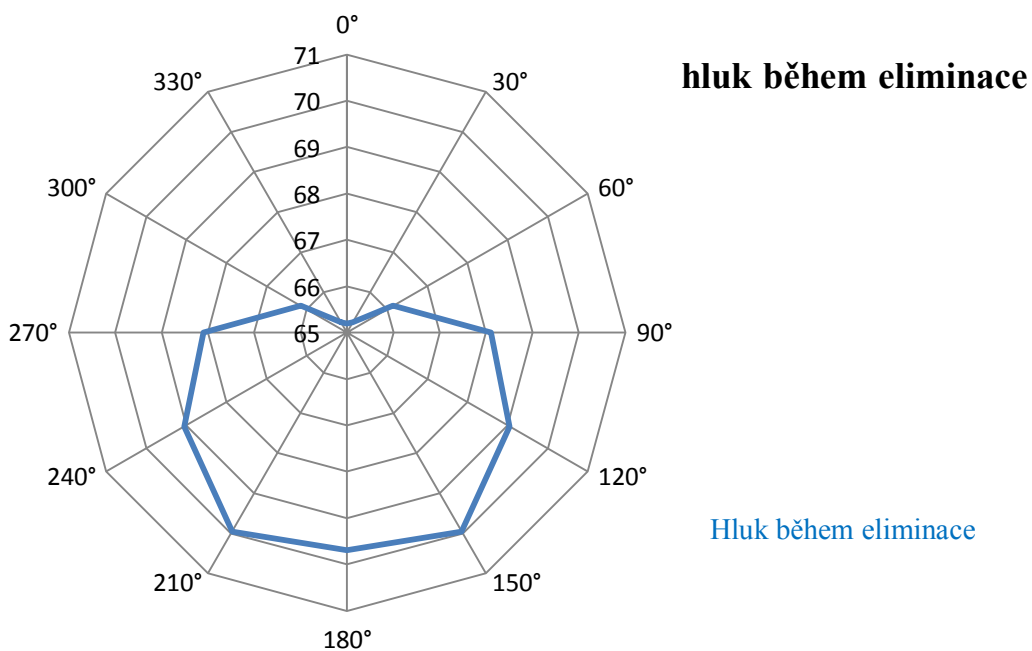


obr. 4-87 Porovnání intenzit hluku před a po eliminaci v grafu od 0dB

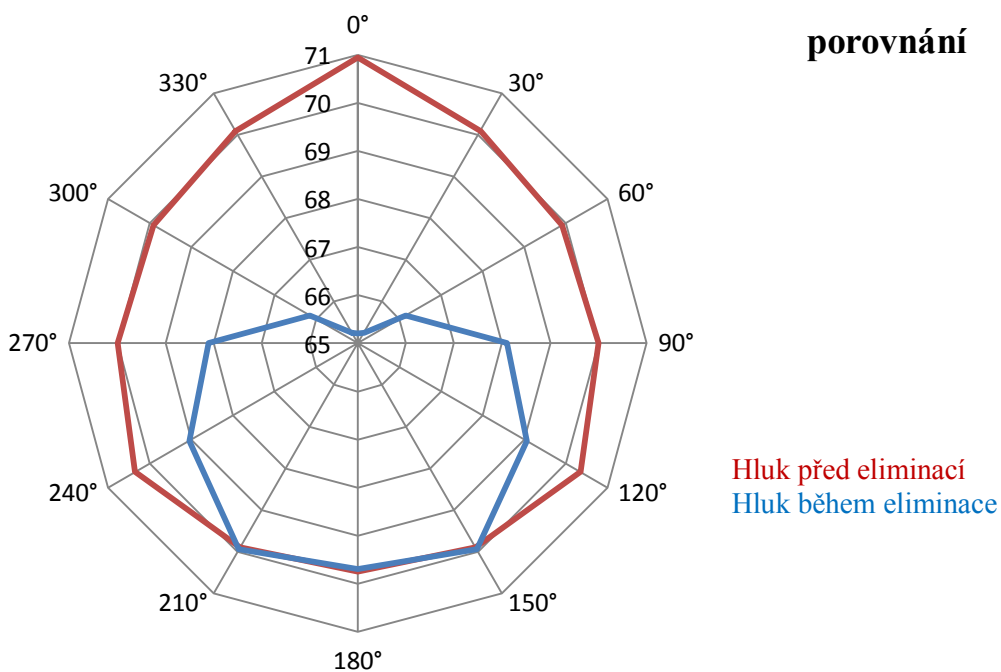
Oproti tomu grafy na obr. 4-88, obr. 4-89 a porovnávací graf na obr. 4-90 a obr. 4-91 jsou záměrně optimalizovány software FlexPro tak, aby co nejlépe znázorňovaly situaci a detaily jednotlivých rozdílů. Grafy tedy nejsou tvořeny od 0 do maxima hodnoty, ale od minimální do maximální hodnoty. Tím software dokáže daleko lépe vykreslit poklesy a nárůsty hladin.



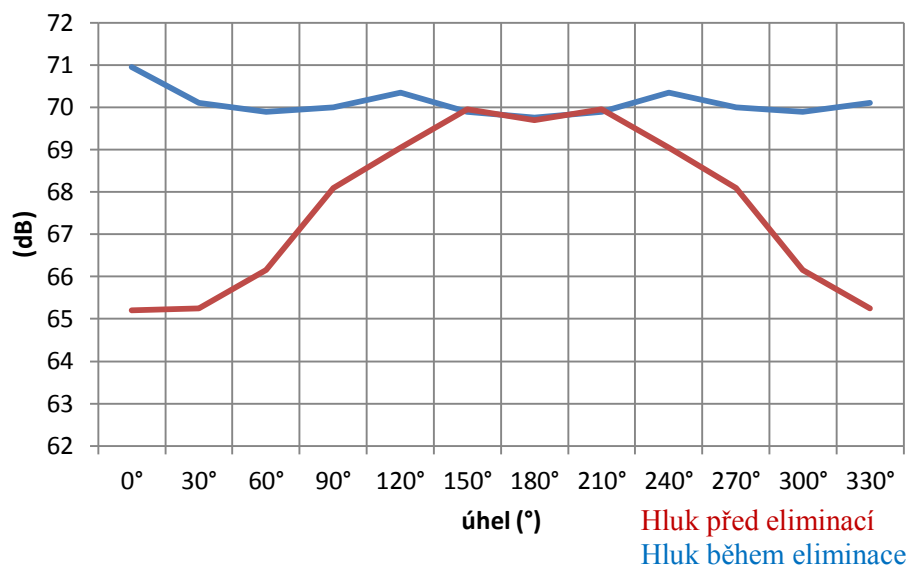
obr. 4-88 Intenzita hluku kolem transformátoru



obr. 4-89 Intenzita hluku kolem transformátoru při působení Protifázového eliminátoru



obr. 4-90 Porovnání intenzit hluku před a po eliminaci

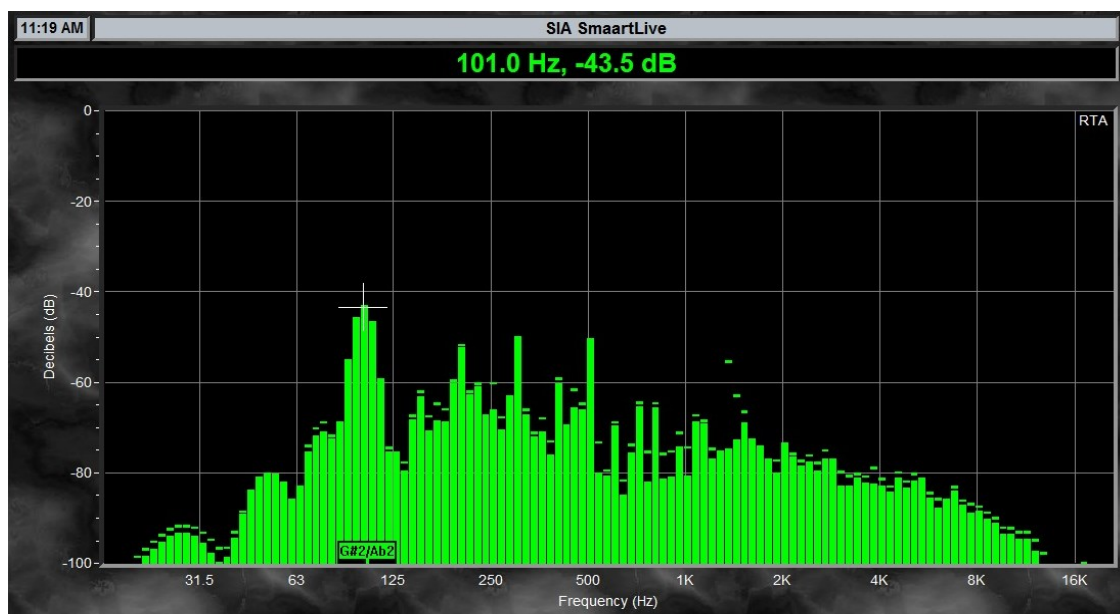


obr. 4-91 Porovnání intenzit hluku před a po eliminaci v grafu od 0dB

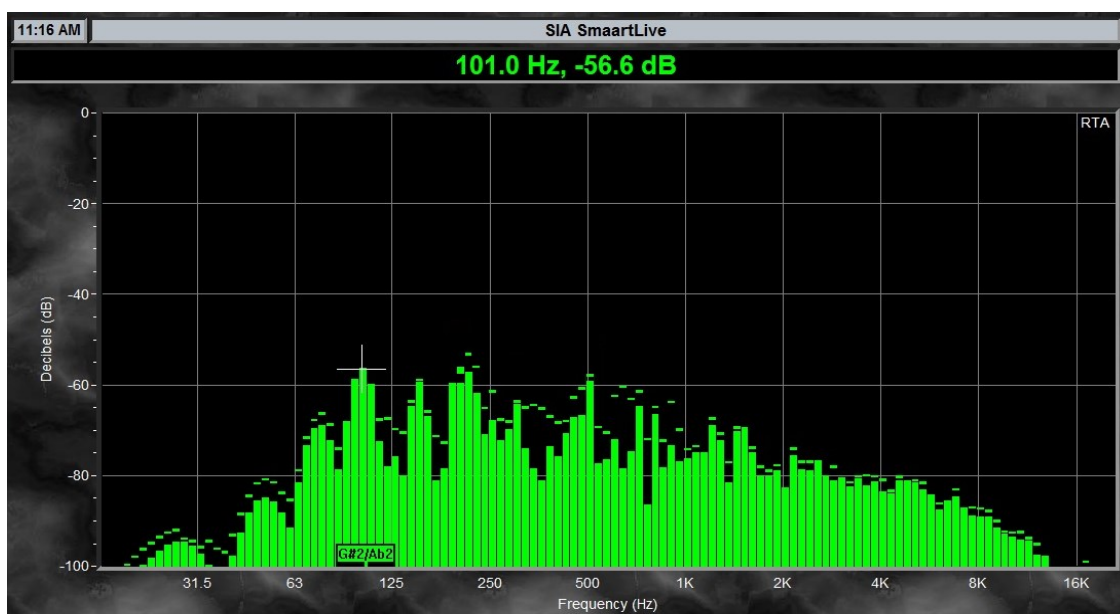
Výslednými grafy bylo porovnání intenzit hluku v transformátorové stanici jak v polárním tak v souřadnicovém provedení.

#### 4.8.2 Spektrální analýzy působení Protifázového eliminátoru

V rámci všech zapojení a měření byla neustále prováděna spektrální analýza hluku transformátoru a to jak za běžného provozu, tak při eliminaci. Ze zachycených grafů spektrálních analýz hluku transformátoru během eliminace i bez ní je jasné patrné, že i na reálném transformátoru byla eliminace úspěšná. Frekvence 101Hz byla potlačena o 13,1dB a také zbylé frekvence se pohybovaly pod hranici -60dB. Na grafu obr. 4-92, jenž představuje spektrální analýzu hluku transformátoru T616, je jasné patrná nosná frekvence 101Hz, ta vystupuje viditelně nad zbytkem spektra. Dále jsou jasné patrné násobky této frekvence 200, 300 a 500Hz. Všechny tyto frekvence přesahují hladinu -50dB.



obr. 4-92 Spektální analýza hluku transformátoru T616



obr. 4-93 Spektální analýza hluku transformátoru T616 během eliminace

## 5 Závěr

Nejdůležitějším přínosem této disertační práce je osobní zkušenost. Osobní zkušenost ve smyslu vytváření projektu s jasným cílem, od úplného začátku, na kterém byla pouze myšlenka. Během tohoto disertačního výzkumu bylo tedy možno pozorovat vznik zařízení od prvních úvah, se kterými je potřeba seznámit okolí a přesvědčit jej, že úvaha stojí na podložených základech, a že má smysl se jí nejen zabývat, ale také fyzicky ji vytvořit. Je podstatné již v této fázi naslouchat okolí, které není zaslepeno mocí osobní myšlenky, ale je schopno realisticky argumentovat. Tento projekt, i přes jeho utopické základy, vznikl díky vizionářství lidí na katedře Elektroenergetiky VŠB – TUO, kteří byli nakloněni vzniku Protifázového eliminátoru. Na počátku byl záměr velice široký, co se týče spektra použití Protifázového eliminátoru, popřípadě jeho instalace již v rámci disertační práce. Postupem času a pod tíhou nových informací, technických limitů a skutečností bylo hledáno zařízení, které by mělo hlukové spektrum co nejjednodušší, a přitom by eliminace měla smysl. Bylo tedy rozhodnuto pokusit se eliminovat hluk výkonových transformátorů.

V těsné blízkosti za myšlenkou jsou první návrhy a simulace, které potvrdily možnost eliminace hluku pomocí protifáze a byly tak další překročenou metou. Z těchto simulací vyplynulo, že v počítačovém prostředí je účinek protifáze 100%. Počítačové prostředí je však dokonalé, ideální prostředí a jen velmi těžce počítá s akustickými veličinami a jejich reálnou aplikací.

Na základě dokončení počítačových simulací a testů, mohlo být tedy přikročeno k realizaci záměru. Jak již bylo řečeno, jedním z nejdůležitějších prvků v celém systému jsou elektroakustické měniče. Jejich výběr byl klíčový. Vytvoření pracoviště a přístrojů pro měření elektroakustických měničů bylo nezbytné pro jejich následnou volbu. Tyto testy probíhaly v bezdozvukové komoře, která je součástí VŠB-TUO a poskytla tak referenční prostředí pro tato měření.

Ani po výběru vhodných komponent nemohlo být stále započato se stavbou samotného modelu eliminátoru. Bylo nutné seznámit se s eliminovanou veličinou, jíž byl v našem případě hluk transformátoru. V průběhu jednoho roku proběhlo nespočetné množství měření hluku výkonových transformátorů, které jsou umístěny na půdě univerzity. Měření probíhala při různých zátěžích transformátorů, proto byla měření tak časově náročná. Pokud jsme chtěli pořídit data z transformátoru, který pracoval v režimu naprázdno, bylo nutné měřit v letních měsících v hodinách, kdy byl provoz školy na minimální úrovni. Naopak maximálního zatížení dosahovaly transformátory v zimním období v ranních nebo odpoledních hodinách, kdy byla škola vytápěná, osvětlená a v plném provozu. Z těchto komplexních a rozsáhlých měření byly vytvořeny závěry, na základě kterých již bylo možno uvažovat o stavbě modelu Protifázového eliminátoru. Výsledky byly spektrální analýzy, spektrografy a spektrogramy, které znázornily obsah jednotlivých frekvencí ve hlukovém spektru. Za nosné hlukové frekvence tak byla označena frekvence 100Hz a dále její násobky, které s hodnotou řádu snižovaly svou hodnotu.

Teprve v okamžiku, kdy již byly známy výsledky měření hluku výkonových transformátorů a také byl ukončen výběr vhodných komponent užitých v systému, bylo možno zahájit výstavbu prvního modelu Protifázového eliminátoru. Ten začal vznikat po necelých třech letech příprav, simulací,



měření a testů. Model byl tvořen přes léto, ve kterém byly také provedeny testy na tomto zařízení. Model byl umístěn v běžné místnosti. Měření již neprobíhala v bezdozvukové komoře, protože bylo nutné ověřit funkčnost v podobném prostředí, ve kterém se transformátory nacházejí. Zvuk se tedy odrážel od stěn a působil tak negativně na celý systém. Model se skládal ze dvou totožných stojanů, z nichž jeden simuloval transformátor a druhý vytvářel protifázovou vlnu. Byla vytvořena schémata zapojení, podle kterých byl model zapojen a následně testován. Z těchto testů vyplynulo, že čím více se situace blíží realitě, tím je složitější dodržet akustické podmínky pro eliminaci. Například při prvním zapojení, kde byla protifáze vytvářena v počítačovém systému, který zároveň simuloval hluk transformátoru, byla eliminace velmi úspěšná a docházelo ke snížení hladiny akustického tlaku v místnosti tak, že klesala téměř k původním hodnotám hluku místnosti. Ve chvíli, kdy byl systém vybaven systémem pro snímání aktuálního hluku transformátoru, začala vznikat zpětná vazba a celý systém byl velice náchylný k tomuto jevu. V průběhu testů se problém podařilo vyřešit a v závěru bylo tedy rozhodnuto o výrobě prvního funkčního prototypu, který bude nainstalován na reálný transformátor.

Po rozhodnutí vytvořit prototyp, který bude nainstalován na reálný transformátor, byl opět nutný návrat to trafostanic. Byly zde zkoumány možnosti instalace zařízení a také navrhována vlastní konstrukce prototypu vzhledem k rozměrům transformátorů a trafostanic. Již bylo známo, na jaké frekvence je nutné se soustředit a jak bude zhruba konstrukce vypadat, muselo být ale také přihlédnuto k bezpečnosti, jak lidí tak zařízení. Jakýkoliv výpadek proudu za chodu školy by mohl mít nedozírné následky, například ztrátu dat, přerušení měřicích postupů atd. Výsledkem těchto příprav bylo rozvržení rozměrů a struktury eliminátoru a také výběr samotného transformátoru, na který bude eliminátor nainstalován.

Následovaly výkresy a 3D modely tvořené pomocí AutoCADu, na základě kterých mohl být eliminátor konstruován. Tyto výkresy a modely byly obrovskou pomocí při výstavbě eliminátoru, protože sloužily nejen k odměřování vzdáleností jednotlivých rovin, otvorů a komponent, ale mohly být také během výroby modifikovány podle toho, jak vznikaly při konstrukci problémy s výrobou. Zde došlo k uvědomění toho, že návrh v počítačovém prostředí je schopen pojmut rozdílné nápady oproti realizaci, která již pracuje s reálnými materiály.

Samotná výroba modelu začala zajištěním konstrukčních materiálů. V případě prototypu již nebyla tvořena dřevným odpadem jako u modelu, ale materiálem pořízeným pro tyto účely. Část konstrukce je nicméně také z odpadního materiálu poskytnutým školou. Jako odpadní materiál byly použity ocelové profily pořízené z lavic a dělicí polorovina zkonstruovaná z bývalé tabule. I u toho následného kroku jsme se snažili smýšlet ekonomicky a ekologicky a využít tak recyklovaných materiálů. Při konstruování jsme se seznámili s propojením projekční a výrobní složky výrobku, konstrukce byla vytvářena svépomocí a byla tak naplněna praktická část disertační práce.

Po dokončení výroby Protifázového eliminátoru byl požádán útvar energetiky o zpřístupnění transformátorové stanice, ve které byl nainstalován námi vybraný transformátor T616. Prototyp byl v rámci jednoho dopoledne dopraven v částečně rozloženém stavu do transformátorovny a sestaven.

Byly započaty testy zařízení. Již před instalací bylo navrženo několik druhů zapojení, podle kterých se mělo postupovat. Veškeré postupy prací v transformátorové stanici byly z důvodu bezpečnosti velmi opatrné a obezřetné a z toho důvodu také velmi zdoluhavé. Výsledky a problémy u jednotlivých druhů zapojení nás krok po kroku posouvaly k výslednému typu zapojení a také závěrečným testům. Z počátku se projevovaly u prototypu nejrůznější problémy, od zpětné vazby až po oscilaci systému samotného, které byly postupně odstraňovány. Jednotlivé komponenty byly v průběhu změn měněny a vzájemně testovány, byly měněny také vzdálenosti mikrofónů vůči transformátoru, ale také vůči eliminátoru. Vše bylo pečlivě zaznamenáváno a data byla archivována pro následné vyhodnocení, popřípadě rozhodování o určitých změnách.

Toto vše vedlo k úspěšnému dokončení prototypu Protifázového eliminátoru, který byl schopen eliminovat nosné kmitočty hluku transformátoru T616 umístěného na VŠB-TUO. Retrospektivně zde bylo shrnuto, co úspěšnému dokončení předcházelo a co vše muselo být vykonáno. U této práce byl zaznamenán kompletní vývoj zařízení, od jeho prvotní myšlenky, až k jeho realizaci. Prostředí pro realizaci bylo velmi náročné, protože manipulace probíhala v prostoru s vysokým napětím a navíc šlo o zdroj energie pro značnou část školy. Při závěrečných testech proto nebyl prostor pro chybu.

Bylo dokázáno, že je Protifázový eliminátor funkční zařízení a je jisté, že pokud by se tímto zařízením začal zabývat tým složený z odborníků pod finanční záštitou komerčního sektoru, stalo by se toto zařízení běžně používanou součástí hlučných zařízení, nebo celých funkčních celků. Při správné digitální optimalizaci by se celá řídicí jednotka dala miniaturizovat a zařízení by bylo možno implantovat to širokého spektra výrobků.

V současné době je již Protifázový eliminátor zapsán jako Užitný vzor na Úřadu průmyslového vlastnictví, pod číslem přihlášky 2013-27722 a číslem zápisu 25699, viz: [44]

Tato práce byla největším poučením, jaké se může studentovi dostat, vedla k samostatnosti, ale zároveň také k poznání nutnosti komunikace.

## Použitá literatura:

- [1] stránky: Pedagogické fakulty Masarykovy univerzity [cit. 2011-10-13], Dostupný na WWW: <http://is.muni.cz/do/ped/kat/fyzika/autem/pages/krajina-auta.html#hluk>
- [2] stránky: Pctuning.cz – citlivost lidského ucha [cit. 2011-10-13], Dostupný na WWW: [http://pctuning.tyden.cz/hardware/multimedia-zvuk-tv/10000-blizi\\_se\\_soumrak\\_samostatnych\\_zvukovych\\_karet?start=2](http://pctuning.tyden.cz/hardware/multimedia-zvuk-tv/10000-blizi_se_soumrak_samostatnych_zvukovych_karet?start=2)
- [3] stránky: zubrno.cz - Hluk a další fyzikální faktory [cit. 2011-10-13], Dostupný na WWW: <http://www.zubrno.cz/studie/kap06.htm>
- [4] stránky: leteckasluchatka.cz – protifáze [cit. 2011-10-13], Dostupný na WWW: <http://www.leteckasluchatka.cz/danr>
- [5] stránky: Golgihoaparát.cz – lidský sluchový orgán [cit. 2011-10-13], Dostupný na WWW: <http://golgihoaparát.blog.cz/0903/21-nervova-soustava>
- [6] stránky: RR-náradí - hlukoměr [cit. 2011-10-13], Dostupný na WWW: <http://www.rr-naradi.cz/zvukomer-fsm-130>
- [7] stránky: northwestern.edu – aktivní eliminace hluku [cit. 2010-04-19], Dostupný na WWW: [http://gilmore2.chem.northwestern.edu/tech/anr\\_tech.html](http://gilmore2.chem.northwestern.edu/tech/anr_tech.html)
- [8] stránky: Sbírka příkladů fyziky - amplituda [cit. 2010-6-25], Dostupný na WWW: [http://www.sbirkaprikladu.cz/sbirka\\_prikladu/mechanicke\\_kmitani\\_a\\_vlneni/10.html?id=10&pp=mechanicke\\_kmitani\\_a\\_vlneni&cp=3&stufen=z&stranka=0](http://www.sbirkaprikladu.cz/sbirka_prikladu/mechanicke_kmitani_a_vlneni/10.html?id=10&pp=mechanicke_kmitani_a_vlneni&cp=3&stufen=z&stranka=0)
- [9] stránky: aktualne.cz – kde ničí hluk zdraví [cit. 2010- 6-25], Dostupný na WWW: <http://aktualne.centrum.cz/domaci/zivot-v-cesku/clanek.phtml?id=520080>
- [10] stránky: vsb.cz – mapa areálu [cit. 2010-6-25], Dostupný na WWW: <http://www.vsb.cz/cs/okruhy/kontakty-a-mapy/mapy-arealu/>
- [11] stránky: pro-sound.com – Sennheiser MKH 416 [cit. 2010-6-25], Dostupný na WWW: <http://www.pro-sound.com/p/SSENMKH416.html>
- [12] stránky: Instrumento.cz – systém tlumení reproduktorů [cit. 2010-6-25], Dostupný na WWW: <http://www.instrumento.cz/clanky-clanek-44-stavba-reproboxu-pro-amatery.html>
- [13] stránky: bpakustika.cz – šíření zvuku v místnostech [cit. 2010-6-25], Dostupný na WWW: <http://www.bpakustika.cz/nepruzvucnost.html>
- [14] stránky: temtecsa.com – frekvenční generátor Rigol [cit. 2010-6-25], Dostupný na WWW: <http://www.temtecsa.com.ar/index.php/cPath/25>
- [15] stránky: zzounds.com – M Audio Fast Track Pro [cit. 2010-6-25], Dostupný na WWW: <http://www.zzounds.com/item--MDOFTRACKPRO>
- [16] stránky: sweetwater.com – Di Box Dual Z Direct [cit. 2010-6-25], Dostupný na WWW: <http://www.sweetwater.com/store/detail/ZdirectDual>
- [17] stránky: emtesco.com – USB osciloskop Hantek [cit. 2010-6-25], Dostupný na WWW: <https://www.emtesco.com/index.php/dso3064kitv.html>
- [18] stránky: audiotek.cz – grafický ekvalizér [cit. 2010-6-25], Dostupný na WWW: <http://www.audiotek.cz/product-36002-bss-fcs-966>
- [19] stránky: soundtech.sk – Zesilovač BV audio [cit. 2010-6-25], Dostupný na WWW: <http://www.soundtech.sk>

- [20] stránky: adamus.pl – digam 5000 [cit. 2010-6-25], Dostupný na WWW:  
<http://www.wynajem.adammus.pl/koncowski-stopnie-mocy/28-powersoft-digam-7000-cyfrowy-wzmacniacz-mocy.html>
- [21] stránky: taiaudio.com – jednotka SQN [cit. 2010-6-25], Dostupný na WWW:  
<http://www.taiaudio.com/ENG-Mixers/SQN-Electronics-Limited-SQN5S-5:2-ENG-Audio-Mixer-ta5781.html>
- [22] stránky: gme.cz – oddělovací transform. Diametral [cit. 2010-6-25], Dostupný na WWW:  
<http://www.gme.cz/laboratorni-oddelovaci-transformatory/oddelovaci-transformator/>
- [23] stránky: wikipedia.cz – zpětná vazba [cit. 2010-6-25], Dostupný na WWW:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Zp%C4%9Btn%C3%A1\\_vazba](http://cs.wikipedia.org/wiki/Zp%C4%9Btn%C3%A1_vazba)
- [24] TOMALISON, H.; <http://www.mefedia.com/>– Anti-noise by Tomlinson Holman, Accessed on: 2010-05-15, pp.78-90, (2009)
- [25] WINKLER, M. *Problémy hluku železniční dopravy*, BRNO VUT (2010)
- [26] SMETANA, S. *Měření hluku a chvění. Praha: SNTL*, 209 s. ISBN 04-526-74. (1974)
- [27] KOŽNAR, P.; *Hluk v dopravě a jeho vliv na životní prostředí*, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice (2004)
- [28] CHMELÍK, K.. *Stejnoseměrné a komutátorové stroje, obecný stroj*, VŠB – Technická Univerzita Ostrava., ISBN 80-248-0314-3, pp.17-34, (2003)
- [29] HAMATA V.; *Hluk trsnstřmátorů*; Academia, pp.153-159, (1987)
- [30] MANWELL J.F ;McGowan J.G & Rogers A.L, (2002) *Wind energy explained, design and application*, University of Massachusetts, Amherst, USA., ISBN 13: 978-0-471-49972-5H/B
- [31] Norma ČSN 01 1601, ČSN EN ISO 266, Acoustics. Frequences for measuring
- [32] Norma ČSN EN ISO 3740, Acoustics - Determination of sound power levels of noise.
- [33] MIŠÁK S.(2007) *Učební texty Technická Diagnostika*, VŠB – Techn. University of Ostrava.
- [34] BRIŠ, LITSCHMANNOVÁ: *Statistika I. pro kombinované studium*, VŠB-TUO, (2004), dostupné na <<http://home1.vsb.cz/~lit40/STA1/statistika.html?button=Statistika+I>>
- [35] HASSALL, Z. *Akustic Noise Measurement*. Dánsko: Bruel Kjaer, (1960)
- [36] LYONS, R. *Understanding Digital Signal Processing*. USA: Prentice Hall PTR, (2001). ISBN 0-20163467-8.
- [37] KUDLÁČEK, I. *Degradační procesy I.* Praha: ČVUT, (1994). ISBN 80-01-01098-8.
- [38] VALKENBURG, M.E. *Analog filter design*. New York: Oxford University Press, (1982). ISBN 0-19-510734-9.
- [39] POKORNÝ,V. *Automatické měření charakteristik mikrofonů*. Ostrava VŠB – TUO, (2009)
- [40] MORKUS, F. *Reprodukční soustava pro laboratorní měření směrových charakteristik*. BRNO VUT (2011)
- [41] STARKA, M. *Vliv polohy a velikosti perforace bubínku na přenosovou funkci ucha* Brno, VUT (2011)
- [42] Stránky: hlukovekryty.cz – hluk el. strojů [cit. 2013-8-12], Dostupný na WWW:  
<http://www.hlukovekryty.cz/clanky-o-hluku&clanek=hluk-elektrickych-stroju-tocivych.html>
- [43] Stránky: hlukovekryty.cz – redukce hluku [cit. 2013-8-12], Dostupný na WWW:  
<http://electronics.howstuffworks.com/gadgets/audio-music/noise-canceling-headphone3.htm>
- [44] <http://isdv.upv.cz/portal/pls/portal/portlets.pts.det?xprim=1960174&lan=cs>.

## Publikační činnost

### *Článek ve sborníku konference z databáze ISI Proceedings - D*

- [P1.] POKORNÝ V., MIŠÁK, S.: Eliminace emisního hluku elektrických strojů a přístrojů pomocí protifáze. In Sborník konference EPE 2010, Brno, MSD, s.r.o., 2010, 859, ISBN 978-80-214-4094-4
- [P2.] POKORNÝ V., MIŠÁK, S.: Eliminate the Noise of Wind Power Plants by Antiphase. In sborník konference DAAAM 2010, VIENNA:DAAAM INTERNATIONAL, 2010, vol. 21, 1111-1112, ISBN 978-3-901509-73-3
- [P3.] POKORNÝ V., MIŠÁK, S.: Elimination the Noise of Electrical Transformers by Antiphase. In Sborník konference IEEEIC 2011, Rome, Italy, 2011, IEEE Catalog Number: CFP1151I-CDR, ISBN 978-1-4244-8781-3
- [P4.] POKORNÝ V., MIŠÁK, S.: Elimination the Noise of Electrical Transformers by Antiphase. In Sborník konference EPE 2011, Ostrava, 2011, ISBN 978-80-248-2393-5
- [P5.] POKORNÝ V., MIŠÁK, S.: Research of Elimination the Noise of Power Transformers. In Sborník konference IEEEIC 2012, Venice, Italy, 2012, IEEE Catalog Number: CFP1251I-PRT, ISBN 978-1-4577-1830-4
- [P6.] POKORNÝ V., MIŠÁK, S.: Purpose Of Noise-Elimination Of Power Transformers. In Sborník konference EPE 2012, Brno, 2012, ISBN 978-80-214-4514-7

### *Článek ve sborníku konference*

- [P7.] POKORNÝ V.: Elimination the noise of electrical devices by Antiphase, In sborník konference WOFEX 2010, Ostrava 2010, ISBN 978-80-248-2276-1
- [P8.] POKORNÝ V.: Elimination the noise of electrical devices by Antiphase, In sborník konference WOFEX 2011, Ostrava 2011, ISBN 978-80-248-2449-9
- [P9.] POKORNÝ V.: Construction of model Antiphase Eliminator. , In sborník konference WOFEX 2012, Ostrava 2012, ISBN 978-80-248-2769-8

## Řešené grantové a rozvojové projekty

- SP/201073 Využití hybridních obnovitelných zdrojů elektrické energie,
- SP2011/130 Energeticky soběstačný „SMART“ dům.



## Seznam obrázků

obr. 1-1 Mapa české republiky znázorňující počet obyvatel vystavených stálému působení akustického tlaku většího než 70dB [9]	13
obr. 2-1 Znázornění systému eliminace hluku transformátoru pomocí protifáze	14
obr. 2-2 Systém eliminace hluku větrné elektrárny pomocí protifáze [30]	17
obr. 3-1 Šíření zvuku (A - plocha dělicí konstrukce, Z - zdroj, P – přijímač) [13]	18
obr. 3-2 Vlnová délka [8]	20
obr. 3-3 Práh slyšitelnosti [3]	22
obr. 3-4 Křivky stejné hlasitosti a citlivost lidského ucha [2]	22
obr. 3-5 Střední ucho [5]	24
obr. 3-6 Hluková mapa [1]	25
obr. 3-7 Zvukoměr [6]	27
obr. 3-8 Průběhy váhových křivek filtrů typů A, B a C [25]	28
obr. 3-9 Rozdělení hluku elektrických zařízení podle vzniku	37
obr. 3-10 Sinusový průběh akustického signálu	40
obr. 3-11 Otočení signálu	41
obr. 3-12 Znázornění působení protifáze	41
obr. 3-13 Schéma systému sluchátek využívajících protifázovou eliminaci hluku	42
obr. 4-1 Dvě monofonní stopy obsahující zvolený signál a VU metr ustálený na hladině -6dB	44
obr. 4-2 Posunutí otočeného signálu o pět-tisícin sekundy a následné odečtení.	45
obr. 4-3 Zoom odečteného signálu	45
obr. 4-4 Absolutní odečtení dvou totožných signálů otočených do protifáze.	45
obr. 4-5 Realizované polohovací zařízení pro měření směrových charakteristik	46
obr. 4-6 Schéma zapojení měření pomocí spektrálního analyzátoru Brüel&Kjaer	47
obr. 4-7 Úzce směrový mikrofon sennheiser MKH 416 [11]	47
obr. 4-8 Směrová charakteristika mikrofону Sennheiser MKH 416-P48U3 pro frekvenci 1kHz	48
obr. 4-9 Frekvenční charakteristika mikrofону Sennheiser MKH 416-P48U3	48
obr. 4-10 Blokové schéma záznamového zařízení pro spektrální analýzu	49
obr. 4-11 Měření hlukových emisí Transformátoru	49
obr. 4-12 Přístrojový štítek transformátoru T615	50
obr. 4-13 Spektrální analýza transformátoru T615 při chodu naprázdno	51
obr. 4-14 Spektrogram transformátoru T615 při chodu naprázdno	51
obr. 4-15 Spektrální analýza zatíženého transformátoru T615	52
obr. 4-16 Spektrogram Zatíženého transformátoru T615	52
obr. 4-17 Zoom spektrální analýzy zatíženého transformátoru T615 pro frekvenci 100Hz	53
obr. 4-18 Obrázek ukazující teoretický průběh proudu	53
obr. 4-19 Obrázek ukazující skutečný průběh proudu při měření Transformátoru T615/1	53
obr. 4-20 Měření proudu procházejícím primárním vinutím transformátoru T615/1	54

obr. 4-21 Blokové schéma prototypu Protifázového eliminátoru	55
obr. 4-22 Blokové schéma prototypu Protifázového eliminátoru	56
obr. 4-23 Fotodokumentace stavby modelu Protifázového Eliminátoru	57
obr. 4-24 Model Protifázového eliminátoru při měření intenzity hluku.	58
obr. 4-25 Schéma zapojení a znázornění provedených akustických testů	59
obr. 4-26 Polární graf intenzity hluku v místnosti	60
obr. 4-27 Polární graf intenzity hluku transformátoru	61
obr. 4-28 Polární graf intenzity hluku transformátoru eliminovaného modelem	62
obr. 4-29 Závislost intenzity na vzdálenosti mezi vodiči	63
obr. 4-30 Závislost intenzity na vzdálenosti mezi vodiči	64
obr. 4-31 Hodnota odebíraného výkonu Protifázového eliminátoru	64
obr. 4-32 Transformátor T616 vybraný k instalaci prototypu	66
obr. 4-33 Mapa areálu VŠB-TUO s naznačením rozložení trafostanic.[10]	67
obr. 4-34 Transformátor T616 vybraný k instalaci prototypu	68
obr. 4-35 Výkres dělicí poloroviny (obrysy rílou barvou) opatřené reproboxy (zelená barva)	69
obr. 4-36 3D model dělicí poloroviny opatřený experimentálními bočnicemi	69
obr. 4-37 Konstrukční materiál připravený k dělení	70
obr. 4-38 Dělení a příprava materiálu nosného rámu	71
obr. 4-39 Spojování nosného rámu	71
obr. 4-40 Nosný rám opatřený kolečky	72
obr. 4-41 Rám nastrojen dělicí polorovinou	72
obr. 4-42 Dělicí polorovina přišroubovaná ke konstrukci rámu	72
obr. 4-43 Zajištění výšky poloroviny	72
obr. 4-44 Dělicí polorovina spojená šrouby ke konstrukci rámu	73
obr. 4-45 Dělicí polorovina připravená pro zhotovení otvorů pro reproduktory	73
obr. 4-46 Rozměrový výkres vybraného reproduktoru [11]	74
obr. 4-47 Reprodukter vzasený do dělicí poloroviny	74
obr. 4-48 Ozvučnice se zapuštěnou týlní stranou z důvodu snížení objemu reproboxu	75
obr. 4-49 Ozvučnice s otvorem pro konektorovou miskou	76
obr. 4-50 Reproboxy vytmelené silikonovým tmelem	77
obr. 4-51 Reproboxy osazené akustickými panely zabraňující stojatému vlnění	77
obr. 4-52 Reproboxy osazené akustickými panely a syntetickou buničinou zabraňující stojatému vlnění	78
obr. 4-53 Dělicí polorovina přišroubovaná ke konstrukci rámu	79
obr. 4-54 3D model dělicí poloroviny, ozvučnic a otvorů pro reproduktory a mikrofon	80
obr. 4-55 Dělicí polorovina do níž je již vložen tubus pro mikrofon	80
obr. 4-56 Tubus v němž je vložen mikrofon	81
obr. 4-57 Zadní část zhotovené poloroviny na níž jsou vidět reproboxy a tubus pro mikrofon	81
obr. 4-58 Přední část zhotovené poloroviny	81
obr. 4-59 Transformátorová statice a T616	82



obr. 4-60 Prototyp sestavený u čelní strany T616	82
obr. 4-61 Prototyp umístěný u NN strany Transformátoru, připraven na zapojení	82
obr. 4-62 Generátor libovolných signálů Rigol DG 3121A [14]	83
obr. 4-63 Profesionální zvuková karta M-Audio FastTrack Pro.[15]	84
obr. 4-64 DI Box ART Dual Z Direct [16]	84
obr. 4-65 Čtyřkanálový USB Osciloskop Hantek DSO 3064[17]	85
obr. 4-66 Třetino-oktávový grafická ekvalizér [18]	86
obr. 4-67 Zesilovač BV Audio [19]	86
obr. 4-68 Digitální zesilovač Digam [20]	87
obr. 4-69 Portable Mix SQN A [21]	88
obr. 4-70 Oddělovací transformátor Diametral OT230.012 [22]	88
obr. 4-71 Schéma zapojení Protifázového eliminátoru s frekvenčním generátorem	89
obr. 4-72 Spektrální analýza hluku transformátoru v maximu oscilace Protifázového eliminátoru	90
obr. 4-73 Spektrální analýza hluku transformátoru v minimu oscilace Protifázového eliminátoru	90
obr. 4-74 Zapojení Protifázového eliminátoru s frekvenčním generátorem	91
obr. 4-75 Schéma zapojení Protifázového eliminátoru se software ProTools	92
obr. 4-76 Princip symetrického vedení signálu [39]	92
obr. 4-77 Zapojení konektorů pro symetrické vedení signálu [39]	93
obr. 4-78 Mikrofon Shure SM 57[18]	93
obr. 4-79 Schéma zapojení Protifázového eliminátoru s DI Boxem	94
obr. 4-80 Mikrofon opatřený ochranou proti zpětné vazbě.	95
obr. 4-81 Výsledné schéma zapojení Protifázového eliminátoru s SQN jednotkou	96
obr. 4-82 Popis zapojení Protifázového eliminátoru s SQN jednotkou	96
obr. 4-83 Schéma měření akustické účinnosti Protifázového eliminátoru	97
obr. 4-84 Popis akustických měření Protifázového eliminátoru s SQN jednotkou	98
obr. 4-85 Intenzita hluku kolem transformátoru	99
obr. 4-86 Intenzita hluku kolem transformátoru při působení Protifátového eliminátoru.	99
obr. 4-87 Porovnání intenzit hluku před a po eliminaci v grafu od 0dB	100
obr. 4-88 Intenzita hluku kolem transformátoru	100
obr. 4-89 Intenzita hluku kolem transformátoru při působení Protifátového eliminátoru	101
obr. 4-90 Porovnání intenzit hluku před a po eliminaci	101
obr. 4-91 Porovnání intenzit hluku před a po eliminaci v grafu od 0dB	102
obr. 4-92 Spektální analýza hluku transformátoru T616	103
obr. 4-93 Spektální analýza hluku transformátoru T616 během eliminace	103